La Recherche

20 ans d'OGM Ce qu'ils ont changé

La Recherche

www.larecherche.fr

Mémoire et Sommeil

La mécanique des souvenirs enfin décryptée

Reinhard Genzel ENTRETIEN AVEC UN CHASSEUR DE TROUS NOIRS

MÉMOIRE ET SOMMEIL

N° 512 - JUIN 2016

JUIN 2016 - DOM 7,40 € - BEL 7,40 € - LUX 7,40 € - ALL 8,20 - ESP 7,40 € - GR 7,40 € - ITA 7,40 € - PORT.CONT 7,40 € - CAN 10,5 $ CAN - CH 12,40 FS - MAR 63 DH - TUN 6,50 TND - MAYOTTE 8,80 € - TOM SURFACE 970 XPF - TOM AVION 1620 XPF - ISSN 00295671

M 01108 - 512 - F: 6,40 € - RD

MUSÉE DE MINÉRALOGIE

MINES ParisTech

venez découvrir l'une des plus belles collections mondiales

Expositions

Météorites et leurs impacts
du 10 mai au 27 août

RUBIANT - Photographies
du 6 septembre au 7 octobre

Paula CREVOSHAY - Bijoux
du 8 novembre au 1 février

Horaires d'ouverture
Du mardi au vendredi de 13h30 à 18h
Samedi de 10h à 12h30 et 14h à 17h
Fin de l'admission 1/2 h avant la fermeture.

Tarifs
Plein tarif 6€
Tarif réduit 3€
(scolaires, étudiants, sans emploi, invalides, retraités)
Gratuit pour les enfants de moins de 12 ans

Visites guidées
Forfait 10/25 personnes 70€ + 3€/pers.
Forfait scolaire 50€
Réservation 2 à 3 semaines à l'avance
Tél : 01 40 51 92 90

Pour venir nous voir
RER B Luxembourg BUS 21, 27, 38, 82, 84, 89

Pour nous suivre et nous contacter
musee@mines-paristech.fr
www.musee.mines-paristech.fr
Tél : 01 40 51 91 39
www.facebook.com/pages/Musée-de-minéralogie-Mines-ParistTech

Musée MINES ParisTech
60, Bd Saint-Michel 75006 Paris

L'édito par Sophie Coisne
Rédactrice en chef

Autre OGM, autre débat

Les OGM ont gagné. Aux États-Unis, au Brésil, en Argentine, plus de 90 % du soja cultivé est aujourd'hui génétiquement modifié. Même ordre de grandeur pour le maïs. Les OGM fêtent leurs vingt ans cette année. Et malgré les polémiques qui sont nées avec eux, force est de constater qu'ils ont conquis – au sens amoureux du terme – bon nombre d'agriculteurs dans le monde, comme vous pourrez le lire dans notre enquête (p. 79).

L'ACQUISITION D'UN OU PLUSIEURS GÈNES étrangers a conféré à ces plantes des armes pour lutter contre les nuisibles. Elle a aussi généré des problèmes nouveaux. L'évolution, on le sait, est à l'œuvre à l'échelle de la parcelle. L'utilisation des OGM a conduit à l'épandage massif d'herbicides et provoqué la sélection de « mauvaises herbes » résistantes. Ce qui a nécessité l'élaboration de plantes mieux dotées en gènes étrangers… Dont le recours aboutira fatalement à une nouvelle pression sélective!

QUAND ON AJOUTE À CE PHÉNOMÈNE la question de la réglementation des OGM et de la difficile acceptation de ces semences par la société, on comprend mieux la tendance adoptée actuellement par les professionnels de l'amélioration végétale. Fini le recours à des gènes étrangers. Dotés des outils de plus en plus précis de la génétique, des scientifiques manipulent directement les gènes de la plante pour lui apporter la qualité qui fait défaut.

LE CHAMPIGNON DE PARIS en est un exemple récent. En retirant à son ADN quelques paires de bases bien localisées, l'équipe de Yinong Yang, de l'université d'État de Pennsylvanie, l'a rendu résistant au brunissement. Pour ce faire, elle a eu recours à une technique d'édition du génome récente (2012) : CRISPR-Cas9.

COMMENT QUALIFIER LA PLANTE OBTENUE ? Beaucoup utilisent le terme de « nouvel OGM », histoire de ne pas oublier la manipulation initiale. Ce champignon se distingue toutefois des OGM historiques par l'absence de gène étranger. Faut-il dès lors le soumettre aux mêmes exigences d'évaluation, de traçabilité, d'étiquetage ? D'autant qu'on manque de recul face à la technique de manipulation utilisée. Les États-Unis ont tranché : c'est non. Le champignon de Paris a rejoint en avril la trentaine d'organismes au génome modifié par génie génétique et qui échappent à la réglementation du département américain de l'Agriculture. En France, la question fait nettement plus débat. Sept associations viennent de démissionner du Haut Conseil des biotechnologies chargé du dossier, pour désaccord sur le traitement à réserver aux nouveaux OGM.

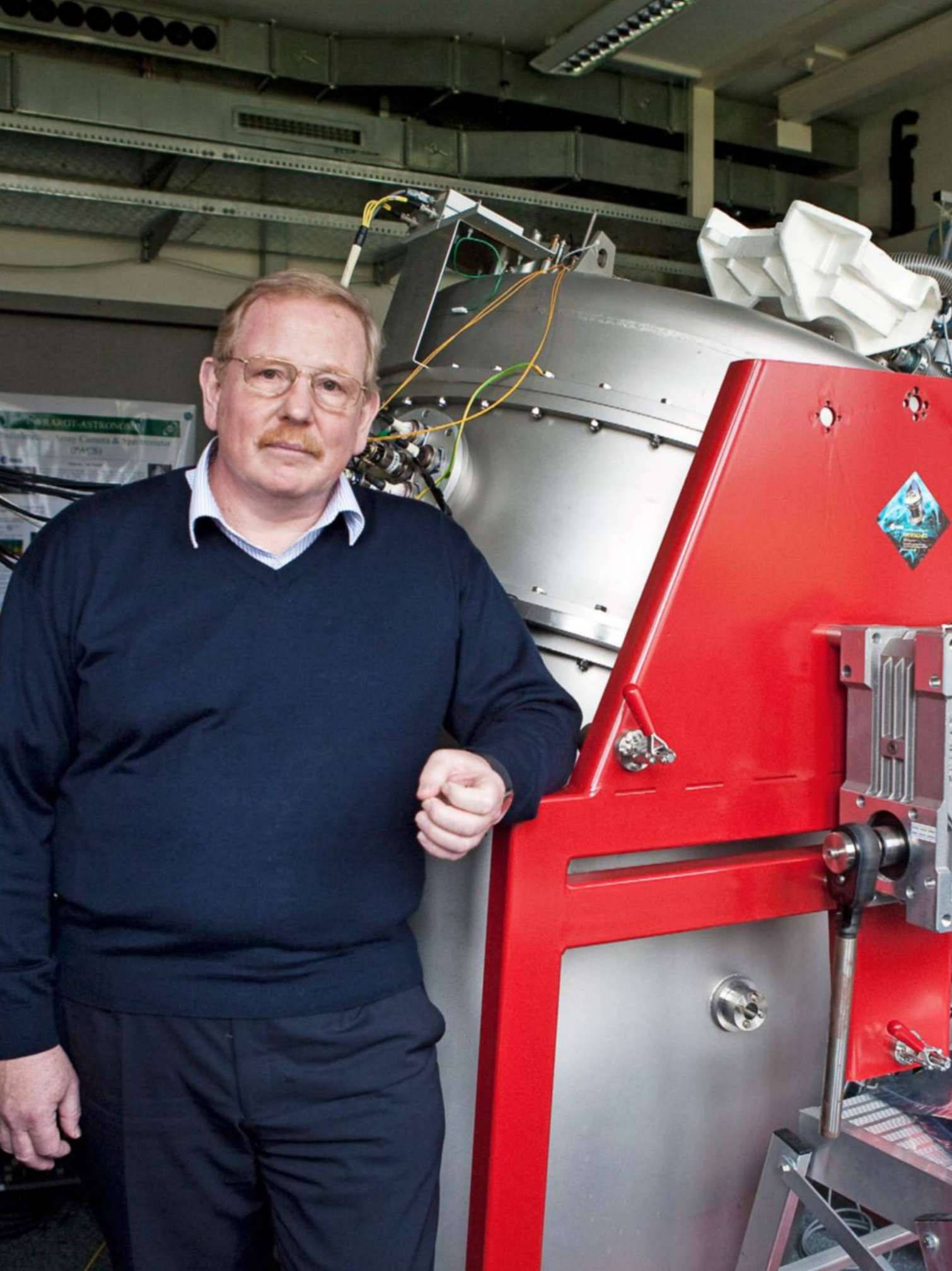
SOPHIA PUBLICATIONS : 8, rue d'Aboukir 75002 Paris. Tél. : 01 70 98 19 19 • **e-mail rédaction :** courrier@larecherche.fr • Pour joindre directement par téléphone un membre de la rédaction, composez le 01 70 98, suivi des quatre chiffres placés après son nom. Par mail, libellez l'adresse sur le modèle : initiale du prénom suivi du nom@sophiapublications.fr (sans accents).

Pour toute question concernant votre abonnement : 01 55 56 70 56 • **Adresse :** *La Recherche,* 4 rue de Mouchy 60438 Noailles Cedex. **Tél. :** 01 55 56 71 15. • **ABONNEMENTS : Tarif France :** 1 an 10 nos + 1 n° double 67 euros. 1 an 10 nos + 1 n° double + 4 hors-séries 89 euros. **Tarif international :** nous contacter. **E-mail :** abo.recherche@biwing.fr. • **Suisse :** Edigroup. Tél. : (0041) 22 860 84 01 • **Belgique :** Edigroup. Tél. : (0032) 70 233 304 • **Achat de revues et d'écrins *La Recherche*** – BP65 – 24, chemin latéral 45390 Puiseaux. **Tél. :** 02 38 33 42 89

La Recherche est publiée par Sophia Publications, filiale de Sophia Communications • **Président-directeur général et directeur de la publication :** Thierry Verret, assisté de Nelly Chirio (19 70) • **Directeur éditorial :** Maurice Szafran • **Directeur délégué :** Jean-Claude Rossignol • **Rédactrice en chef :** Sophie Coisne • **Rédactrice en chef technique :** Catherine Caltaux • **Conception graphique :** Dominique Pasquet • **Assistante :** Gabrielle Monrose (19 06) • **Chef des informations :** Philippe Pajot (19 29) • **Chefs de rubrique :** Hervé Cabibbo (19 30), Mathias Germain (19 33) • **Rédacteurs :** Gautier Cariou (19 31), Vincent Glavieux (19 32), Bérénice Robert (19 34), Sylvain Guilbaud (19 38) • **Service photo :** Claire Balladur (19 41) • **Secrétaire de rédaction :** Véronique Fuvel (19 36) • **Maquette :** Maryvonne Marconville (19 28) • **Ont collaboré à ce numéro :** Michèle Bourgeois, Antoine Cappelle, Françoise Roux • **Responsable fabrication :** Christophe Perrusson (19 10) • **Activités numériques :** Bertrand Clare (19 08) • **Ressources humaines :** Agnès Cavanié (19 71) • **Communication :** Nelly Chirio (19 70) • **Directeur des ventes et promotion :** Valéry-Sébastien Sourieau (19 11) • **Vente messageries VIP-diffusion :** Frédéric Vinot • numéro vert 0800 51 49 74 • **Responsable gestion abonnements :** Isabelle Parez (19 12) • **Responsable du marketing direct :** Linda Pain (19 14) • **Responsable administratif et financier :** Vincent Gentric (19 18) • **Comptabilité :** Teddy Merle (19 15) • **Diffusion librairies :** DIF'POP'. Tél. : 0143620807 Fax : 0143620742 • **Régie publicitaire :** Médiaobs 44, rue Notre-Dame-des-Victoires 75002 Paris. Tél. : 01 44 88 97 70. Fax : 01 44 88 97 79 • e-mail : pnom@mediaobs.com • **Pour joindre directement une personne,** composez le 01 44 88, suivi des quatre chiffres placés après son nom. • **Directeur général :** Corinne Rougé (93 70) • **Directeur commercial :** Jean-Benoît Robert (97 78) • **Directeur du pôle Sciences :** Sylvain Mortreuil (97 75) • **Partenariats :** Karine Grossman (89 08) • **Studio/Maquette/Techniques :** Cédric Aubry (89 05) • **Imprimerie :** G. Canale & C., Via Liguria 24, 10071 Borgaro (TO), Italie. Dépôt légal à parution.

Les titres, les intertitres, les textes de présentation et les légendes sont établis par la rédaction du mensuel. La loi du 11 mars 1957 interdit les copies ou reproductions destinées à une utilisation collective. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur, ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite (article L.122-4 du Code de propriété intellectuelle). Toute copie doit avoir l'accord du Centre français du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris. Tél. : 01 44 07 47 70. Fax : 01 46 34 67 19). L'éditeur s'autorise à refuser toute insertion qui semblerait contraire aux intérêts moraux ou matériels de la publication. Commission paritaire : 0919 K 85863. ISSN 0029-5671. CRÉDITS COUVERTURES : GETTY IMAGES / FMAJOR - JAMES HOLMES/SPL/COSMOS

GIL LEFAUCONNIER



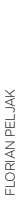
entretien avec

Reinhard Genzel

Selon toute évidence, un trou noir supermassif se cache au cœur de notre Voie lactée. Ce sont, entre autres, les observations de l'astronome allemand Reinhard Genzel qui ont permis d'arriver à cette conclusion. Entretien avec un chasseur de trous noirs qui n'en finit pas de scruter le centre galactique.

“Les trous noirs massifs ont joué un rôle énorme dans l'évolution des galaxies”

Propos recueillis par Sylvain Guilbaud



L'astrophysicien Reinhard Genzel compte sur l'instrument Gravity, installé au Chili, pour mettre en évidence la déformation de l'espace-temps prédite par la relativité générale.

FLORIAN PELJAK

Voici plus de vingt-cinq ans que Reinhard Genzel observe sans relâche la région la plus centrale de notre galaxie, la Voie lactée. Son but est de répondre à une question : cette région abrite-t-elle un trou noir supermassif, plusieurs millions de fois plus massif que le Soleil ? Beaucoup d'astrophysiciens pensent que de tels gargantuas célestes résident au cœur de la plupart des galaxies. Mais comment prouver l'existence d'astres qui sont par définition invisibles ? Pour l'astronome allemand Reinhard Genzel et ses collègues, la méthode est simple : suivre minutieusement le mouvement des étoiles les plus proches du centre galactique pour traquer l'influence du trou noir sur elles. En pratique, cela nécessite de concevoir des instruments de pointe et d'utiliser les meilleurs télescopes au monde. À ce jour, les chercheurs ont obtenu des indices très prometteurs et ils s'apprêtent à installer Gravity, un nouveau détecteur, pour tenter de s'en approcher encore plus.

La Recherche En ce moment, les trous noirs font l'objet de toutes les attentions : votre projet Gravity, l'Event Horizon Telescope, la recherche des ondes gravitationnelles… Pourquoi ?

Reinhard Genzel C'est vrai que nous vivons une période assez exceptionnelle de ce point de vue. Un trou noir est très simple en principe : il s'agit d'un objet dont la gravité est si forte que même la lumière ne peut s'en échapper. Autour de lui, il existe une frontière qui ne peut être franchie que dans un seul sens, appelée « horizon des événements ». Il faut savoir qu'il existe en théorie deux types de trous noirs. Les « stellaires », d'une dizaine de fois la masse du Soleil au maximum, résultent de la mort des étoiles massives et il y en a sans doute des millions dans la Voie lactée. Mais ceux qui se trouveraient au centre des galaxies font plusieurs millions de fois la masse du Soleil. Une des raisons pour lesquelles ces trous noirs massifs ou supermassifs sont un •••

BIO

1952 Reinhard Genzel naît dans la région de la Hesse, en Allemagne.
1978 Il soutient un doctorat en radioastronomie à l'université de Bonn.
1980 Il rejoint l'université de Californie à Berkeley en tant que postdoctorant.
1986 Il est nommé directeur de l'Institut Max-Planck de physique extraterrestre à Munich.
1988 Il devient professeur honoraire à l'université Louis-et-Maximilien de Munich.
1999 Il est professeur à l'université de Californie à Berkeley.
2007 Il reçoit la médaille Albert Einstein.
2012 Il reçoit avec Andrea Ghez, de l'université de Californie à Los Angeles, le prix Crafoord d'astronomie, pour leur observation des étoiles orbitant autour du centre galactique, indiquant la présence d'un trou noir supermassif.

••• sujet brûlant est qu'ils ont joué un rôle énorme dans l'histoire de l'évolution des galaxies qui les abritent. Nous sommes seulement en train d'explorer et de comprendre cette histoire.

Que pensez-vous de l'observation directe des ondes gravitationnelles annoncée en février ? Diriez-vous qu'il s'agit de la meilleure preuve de l'existence des trous noirs ?

Cette annonce était fantastique. La détection des ondes gravitationnelles rend l'hypothèse des trous noirs très convaincante. En tant que scientifique, je pense qu'il faut être prudent et attendre de voir si cette interprétation continue de tenir avec de futures détections. Si c'est le cas, ce sera une preuve très forte de la justesse de la relativité générale. Je suis très confiant sur ce point, je ne vois aucune raison pour laquelle le contraire se produirait car le signal que Ligo (*) a capté des ondes gravitationnelles était vraiment magnifique.

Vos observations de notre galaxie apportent également une preuve très convaincante de la présence d'un trou noir supermassif en son centre (1). Comment prouve-t-on que quelque chose dans l'espace est un trou noir ?

Il faut prouver, comme le prédit la relativité générale, que le potentiel gravitationnel est concentré dans une petite région de l'espace dans laquelle se trouve toute l'énergie et toute la masse. Dans le cas du centre de notre galaxie, cette zone est à peine plus grande que le Soleil. À cette échelle, c'est une région très petite. L'avantage est que nous n'avons pas besoin de voir le trou noir en tant que tel. Un trou noir est noir dans le sens où quelque chose qui disparaît derrière l'horizon des événements ne peut plus du tout communiquer avec l'extérieur. Mais juste avant que la matière ne tombe dans un trou noir, nous la voyons souvent irradier de la lumière. C'est parce que l'énergie gravitationnelle est convertie en énergie thermique, qui chauffe la matière, laquelle émet du rayonnement. Mais voir ce rayonnement ne suffit pas à prouver qu'il y a un trou noir. Se demander comment démontrer cette présence revient à se demander comment on se rendrait compte de l'existence du Soleil s'il ne brillait pas.

Et comment ferait-on ?

Grâce aux planètes, comme l'ont fait l'astronome danois Tycho Brahe au XVI^e^ siècle et l'Allemand Johannes Kepler au XVII^e^ siècle. En mesurant leur mouvement et en constatant que leur orbite est quasi circulaire et que leur vitesse augmente sur certaines portions de trajet, nous en déduirions qu'il y a un objet central dont la masse est égale à une masse solaire. De plus, la planète la plus proche du centre, Mercure, donnerait une contrainte sur la taille maximale de l'objet central. Bien sûr, dans ce cas, cette contrainte n'est pas assez forte pour dire si le Soleil est un trou noir ou pas.

C'est cette méthode que vous avez appliquée au centre de la Voie lactée ?

Oui, c'est exactement ce que nous avons fait. Lorsque j'ai commencé ce travail dans les années 1980 à Berkeley, en Californie, nous n'utilisions pas des planètes, mais le gaz à proximité du centre galactique. En mesurant le mouvement de ce gaz par spectroscopie, c'est-à-dire en analysant la lumière qu'il émet, nous avons déduit qu'il y avait une masse très concentrée, plusieurs millions de fois plus élevée que celle du Soleil. C'était correct, mais ce n'était pas encore suffisamment convaincant pour crier au trou noir. D'abord parce que les nuages de gaz que nous regardions étaient quand même assez loin du centre galactique. Et surtout parce que nous n'étions pas sûrs que le gaz était seulement mû par la gravité exercée par l'objet central. D'autres choses auraient pu être à l'origine de ce mouvement : les vents stellaires, le champ magnétique…

Qu'avez-vous fait alors ?

Nous sommes passés à l'observation des étoiles proches du centre galactique. Ce fut une grande surprise car nous ne nous attendions pas à voir des étoiles si proches du centre galactique. Si nous avions demandé à un théoricien à l'époque : *« Devons-nous faire cette expérience avec des étoiles ? »*, il nous aurait répondu : *« Il n'y a pas*

(*) **Ligo** est l'observatoire d'ondes gravitationnelles par interférométrie laser situé aux États-Unis.

d'étoiles là-bas, ne le faites pas. » Mais nous n'avons pas fait les choses dans cet ordre. Nous avons commencé par construire le télescope et, tout à coup, nous avons vu ces étoiles. Observer leur mouvement propre sur le ciel nous a pris cinq ou six ans, au début des années 1990. Cela a donné une bonne indication, pas encore tout à fait complète car si on veut reconstruire l'orbite d'une étoile, connaître sa position et sa vitesse ne suffit pas, il faut aussi avoir l'accélération, ou alors connaître une portion de l'orbite. Toutes ces observations ont pris plus de temps et ne sont devenues possibles qu'avec l'arrivée des télescopes de 10 mètres de diamètre.

Pourquoi était-il difficile d'observer les étoiles à proximité du centre de la galaxie ?

D'abord parce qu'on ne peut pas observer directement la lumière visible émise par le centre de la Voie lactée : cette lumière est absorbée par les poussières. Nous devons donc utiliser des instruments dans l'infrarouge. Ensuite, il y a les turbulences de l'atmosphère terrestre. Elles perturbent la lumière qui nous provient des étoiles et floute les images de façon si importante que, même avec un miroir de 4 mètres de diamètre, il est impossible d'arriver à la limite de diffraction du télescope, qui donne en théorie la meilleure résolution atteignable par un instrument.

La première innovation pour surmonter ce problème fut « l'interférométrie des tavelures », initiée par Antoine Labeyrie, en France. Cela consiste à prendre plusieurs images avec des temps d'exposition très courts afin de figer la turbulence atmosphérique, puis dans un second temps de superposer ces images sur ordinateur. Les images obtenues ont une très bonne résolution angulaire, mais sont très bruitées. Une meilleure technique est apparue vers l'an 2000 : l'optique adaptative. Le télescope possède alors un miroir déformable qui compense la perturbation introduite par l'atmosphère. Dès lors, nous avons utilisé cette technique avec le Very Large Telescope (VLT) au Chili. Il fut possible d'avoir de très bonnes images d'étoiles ne mesurant que 15 millisecondes d'angle. Cela nous a permis de voir bouger ces étoiles lointaines en un ou deux ans seulement. Il faut dire aussi que nous n'étions pas le seul groupe à travailler sur ce sujet. L'équipe d'Andrea Ghez, à l'université de Californie, à Los Angeles, observait aussi le centre galactique, mais avec le télescope Keck situé à Hawaï. C'est d'ailleurs une histoire intéressante, nos deux groupes étaient en compétition et la communauté scientifique pouvait analyser nos progrès respectifs et comparer. Finalement, nous avons obtenu le même résultat, ce qui est une preuve satisfaisante qu'il n'y a pas eu d'erreur expérimentale.

Quels furent alors vos résultats ?

En fait, nous avons eu de la chance. À l'heure actuelle, nous avons des informations assez complètes sur 45 étoiles qui tournent autour du centre galactique. Pour deux d'entre elles, nous disposons de l'orbite en entier. C'est spectaculaire de voir ces étoiles se déplacer tranquillement selon une ellipse. Encore plus spectaculaire : ces orbites sont si elliptiques que certaines étoiles s'approchent très près de l'objet central. La plus proche « frôle » le centre à environ 15 heures-lumière, soit trois fois la distance Soleil-Neptune (2).

Avec toutes ces données, nous avons pu conclure que la masse centrale vaut précisément 4,1 millions de masse solaire et qu'elle est contenue dans un rayon d'au maximum 15 heures-lumière. Cette distance est encore très grande, elle vaut enviro n un millier de fois le rayon de l'horizon des événements prévu par la relativité générale pour un trou noir de cette masse. Mais ces mesures, en plus des observations du centre galactique dans le domaine radio, permettent d'exclure les autres possibilités. Si la relativité générale est correcte, alors il n'y a pas d'alternatives à l'existence d'un trou noir supermassif au centre de la Voie lactée. Bien sûr, on peut toujours rétorquer qu'un doute subsiste sur la validité de la relativité générale dans des conditions si extrêmes…

> **“La plus proche étoile « frôle » le centre de la Galaxie à environ trois fois la distance Soleil-Neptune”**

Donc vous n'en avez pas fini.

Quelle est la prochaine étape ?

Le défi est maintenant de s'approcher encore plus près du trou noir, ce que nous allons faire avec l'instrument Gravity (3). Au lieu d'utiliser un seul télescope, nous allons combiner la lumière reçue par les quatre télescopes de 8 mètres du VLT. Cela équivaut à un télescope de 130 mètres de diamètre. C'est le principe de l'interférométrie, qui a déjà été réalisée avec des ondes radio, mais qui est plus délicat à faire dans l'infrarouge. Nous avons commencé à le construire il y a dix ans. L'assemblage a été fini l'été dernier et l'instrument a été expédié au Chili. Nous réalisons les tests avant le début des observations. Jusqu'ici, tout va bien. C'est une expérience •••

(*) **Virgo** est l'observatoire européen d'ondes gravitationnelles par interférométrie laser situé à Pise.

••• très exigeante, la plus difficile que nous ayons jamais menée. Nous voulons obtenir une précision de 10 microsecondes d'angle, ce qui revient à être capable de distinguer une pièce d'un centime d'euro sur la Lune. Si nous pouvons effectuer de telles observations du centre de la Voie lactée dans les années qui viennent, alors nous espérons mettre en évidence des effets prédits par la relativité générale.

Qu'espérez-vous voir en particulier ?

L'étoile qui s'approche au plus près de la région centrale met quinze ans pour parcourir son orbite. Au printemps 2018, elle sera de nouveau au point le plus proche, à 15 heures-lumière du centre. Nous espérons pouvoir mesurer l'effet de précession, c'est-à-dire le déplacement de la position de ce point le plus proche entre deux révolutions de l'étoile. La théorie de la relativité générale prédit ce déplacement, et nous pouvons calculer l'effet que nous devrions observer. Ensuite, si nous avons de la chance, il existe peut-être d'autres étoiles encore plus proches de la région centrale. Nous pourrions alors tester une autre prédiction : l'effet Lense-Thirring. S'il y a bien un trou noir au centre de la Voie lactée, celui-ci possède un spin, qui caractérise sa rotation sur lui-même. Ce spin déformerait l'espace-temps autour du trou noir, ce qui ferait osciller le plan dans lequel tournent les étoiles les plus proches. Ce serait fantastique de mesurer une telle déformation de l'espace-temps car nous pourrions alors mesurer directement le spin du trou noir. Or le spin, avec la masse que nous connaissons déjà, permettrait de décrire complètement le trou noir selon la théorie. Mais comme je l'ai dit, nous devrons avoir de la chance. Jusqu'à présent, nous avons été très bien servis par le centre de notre galaxie. Nous verrons si cela continue.

« Ce serait fantastique de mesurer le spin du trou noir et la déformation de l'espace-temps »

Un réseau de télescopes, l'Event Horizon Telescope (EHT) va bientôt être mis en service pour essayer d'observer le trou noir au centre de notre galaxie. Êtes-vous impliqué dans ce projet ?

Non, mais je suivrai de très près leurs observations. C'est un effort international considérable. L'idée est de mettre en commun des radiotélescopes répartis sur l'ensemble du globe. L'élément clé sera de relier à ce réseau l'ensemble des antennes d'Alma, le grand radiotélescope situé dans le désert d'Atacama au Chili. Ce n'est pas encore prêt et il faut compter encore au moins une année pour le réaliser. Deux instruments de l'Institut de radioastronomie millimétrique, l'un sur le plateau de Bures, en France, l'autre dans le sud de l'Espagne, feront aussi partie de l'EHT. Couplés avec Alma, ils permettront d'obtenir une très bonne résolution angulaire, suffisante pour voir la courbure imprimée par le trou noir à la trajectoire de la lumière. Alors que Gravity en cherchera les effets sur le mouvement des étoiles proches, l'EHT cherchera son influence sur le parcours de la lumière. On parle parfois d'« ombre » du trou noir pour décrire ce phénomène. Même la lumière doit se plier à la courbure de l'espace-temps et si un trou noir est illuminé par-derrière, la lumière qui s'en approche ne peut pas s'échapper. Elle tombe dedans. De face, on voit un anneau brillant (la lumière qui est passée assez loin du trou noir) qui entoure une région sombre, la fameuse ombre.

En un sens, ce serait une preuve visible des propriétés théoriques d'un trou noir. Mais il faut être prudent. Dans deux ou trois ans, nous disposerons d'informations suffisantes en quantité et en qualité pour être exploitées. Et ce sera une avancée capitale.

Quelle est la prochaine grande découverte que vous attendez avec impatience ?

Dans ce domaine, l'expérience ultime serait de voir les ondes gravitationnelles émises par les trous noirs supermassifs. Pour cela, il faut envoyer un interféromètre dans l'espace. C'est le projet eLisa [à l'horizon 2030, NDLR]. S'il pouvait être mené à bien, ce serait fantastique. Le principe est le même que Ligo et Virgo (*) sauf que, dans l'espace, nous pourrions observer des fusions de trous noirs massifs dans tout l'Univers, y compris à des distances qui correspondent aux tout premiers instants. Ce serait bluffant de comprendre la formation de ces premiers trous noirs. Mais c'est aussi extrêmement difficile : il faut envoyer plusieurs satellites à des millions de kilomètres les uns des autres et les aligner avec précision. La communauté astrophysique est sceptique à propos d'eLisa. C'est pourquoi le satellite Lisa Pathfinder vient d'être lancé, afin de tester le principe de la mesure. Son résultat conditionnera l'avenir de la mission. J'espère vraiment que ce sera un succès. ■

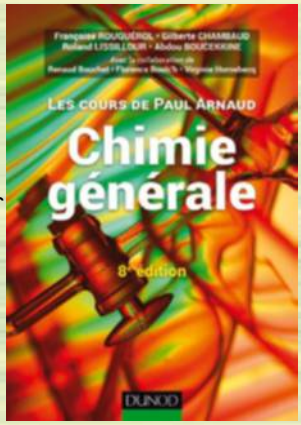
(1) R. Genzel *et al.*, *Rev. Mod. Phys., 82,* 3121, 2010.
(2) R. Genzel *et al.*, *Nature 419,* 694, 2002
(3) www.mpe.mpg.de/ir/gravity

Pour en savoir plus

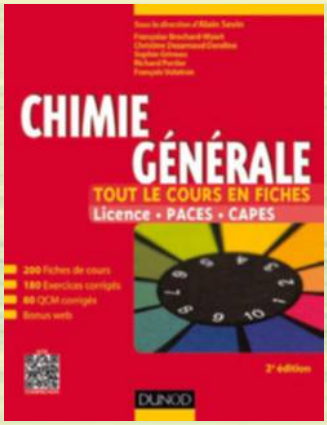
■ Matteo Smerlak, *Les Trous noirs*, Puf, coll. « Que sais-je ? », 2016.

Les beaux jours des SCIENCES chez DUNOD

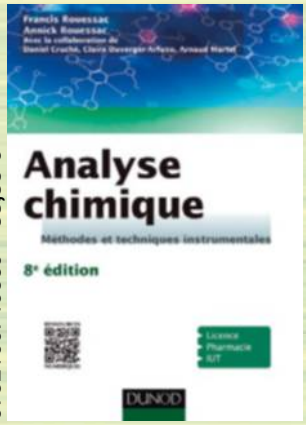
EN CHIMIE



9782100743674 • **39,90 €**

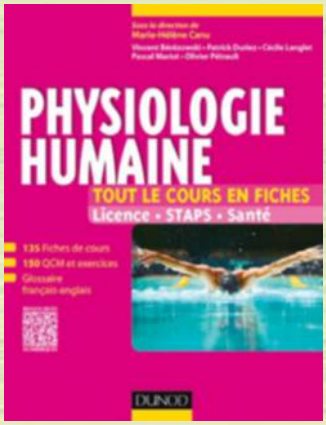


9782100743698 • **37 €**

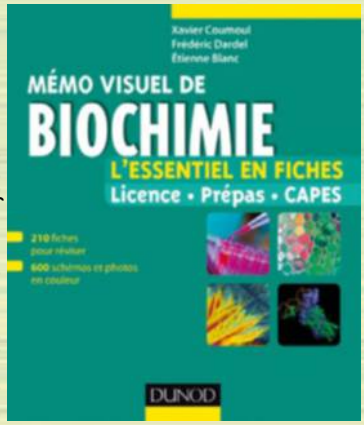


9782100746880 • **35,50 €**

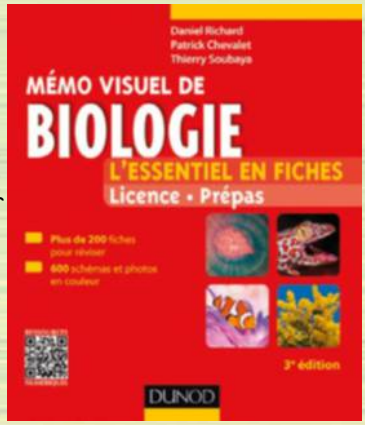
EN BIOLOGIE



9782100740321 • **35 €**

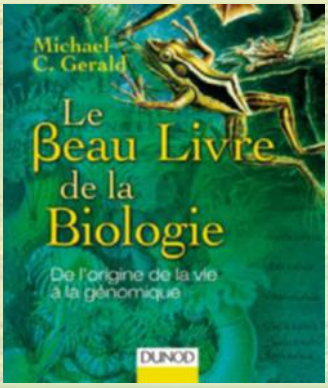


9782100742264 • **22,90 €**

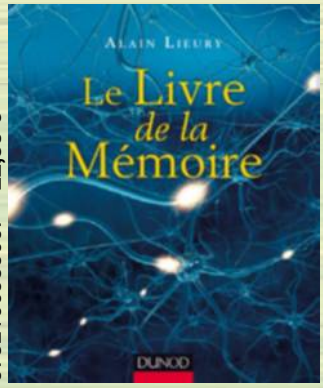


9782100743711 • **22,90 €**

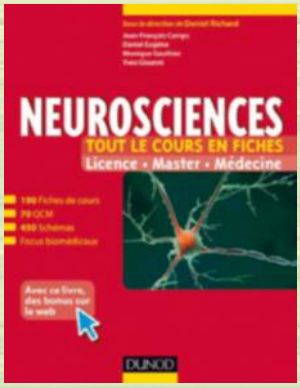
ENCORE PLUS DE SCIENCES…



9782100724093 • **29 €**



9782100585007 • **22,90 €**

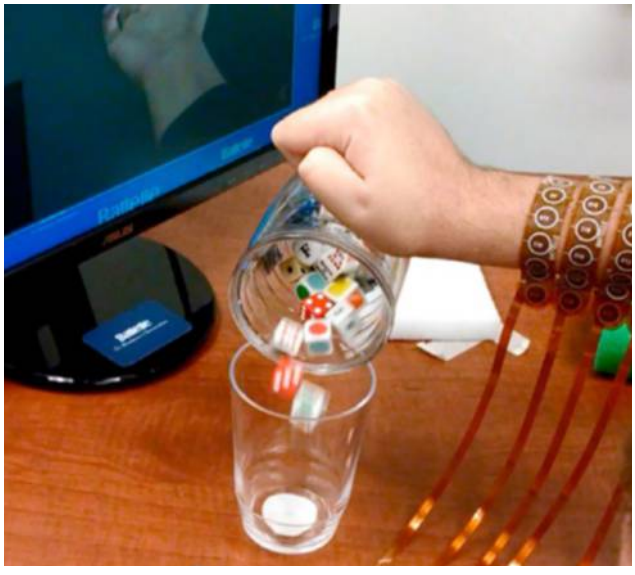


9782100585045 • **38 €**

Tout le catalogue sur **www.dunod.com**

DUNOD
ÉDITEUR DE SAVOIRS

sommaire/juin 2016 - n°512



▲ **ÉVÉNEMENT :** *Un tétraplégique retrouve une certaine motricité.*

▲ **DOSSIER :** *Dormir, une activité essentielle à l'apprentissage.*

3 **ÉDITO**

4 **ENTRETIEN AVEC REINHARD GENZEL**
« Les trous noirs massifs ont joué un rôle énorme dans l'évolution des galaxies »
Propos recueillis par Sylvain Guilbaud

12 **ILS ONT PARTICIPÉ À CE NUMÉRO**

14 **COURRIER**

16 **L'ÉVÉNEMENT** Paralysé, il retrouve l'usage de ses doigts
Anne Debroise

20 actualités

20 **EN BREF**

22 **Océanographie** Du zooplancton qui pèse lourd

23 **Astrophysique** Des traces radioactives de supernovae sur Terre

24 **Écologie** Le courant d'air qui disperse les spores des champignons
Échange de carbone entre arbres adultes

26 **Exobiologie** Une comète artificielle très sucrée

Retrouvez *La Recherche* sur RFI dans l'émission « Autour de la question », le 8 juin à 16 heures
rfi www.rfi.fr

28 **Physique-chimie** Un nouveau mécanisme pour expliquer la formation des nuages

29 **Biologie** Le VIH résiste aux mutations induites

30 **Astronomie** Le successeur de Hubble prend forme

31 **Neurosciences** « Une pensée abstraite peut exister indépendamment du langage »

32 **Physique quantique** Des internautes jouent à améliorer un ordinateur quantique

33 **Biologie** Un cœur de porc dans un babouin

34 **LA CHRONIQUE MATHÉMATIQUE**
Où les électrons se rassemblent-ils ?
Roger Mansuy

36 dossier

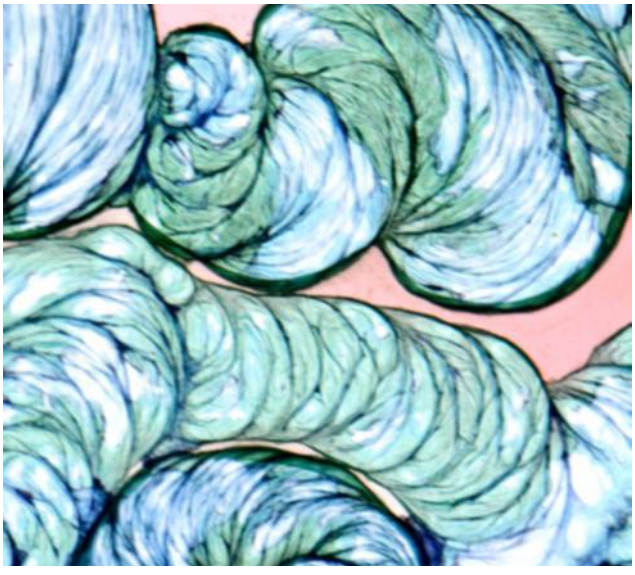
NEUROSCIENCES
SOMMEIL : L'AIDE-MÉMOIRE

38 La fabrique des souvenirs
Karim Benchenane

43 Le sommeil ouvre une fenêtre sur la pensée
Adrien Peyrache

48 Philippe Peigneux : « Une heure trente de sieste suffit à un enfant pour mieux mémoriser »
Propos recueillis par Mathias Germain

OHIO STATE UNIVERSITY WEXNER MEDICAL CENTER/BATELLE - MUAMMER MUJDAT UZEL/GETTY IMAGES



▲ **FONDAMENTAUX :** *Des structures chimiques autant que minérales.*

▲ **IDÉES :** *Les OGM signent-ils la fin des cultures conventionnelles ?*

52 fondamentaux

52 **CHIMIE** Les nouvelles variétés des jardins chimiques confinés
Florence Haudin, Fabian Brau, Julyan Cartwright et Anne De Wit

60 **PHYSIQUE** La quête de la plus rare des désintégrations
Matthew Chalmers. Traduction Jean-Clément Nau

65 **BIOLOGIE** Des cellules pour décrypter le mécanisme de la progeria *Xavier Nissan*

70 **PORTRAIT** Bruno Boulestin, chercheur d'os
Denis Delbecq

75 **HISTOIRE DES SCIENCES** Michel Eugène Chevreul, l'homme qui faisait vibrer les couleurs
Marie-Christine de La Souchère

79 idées

79 **20 ANS DE CULTURES OGM** Qu'ont-elles changé ?

80 **MATIÈRE À PENSER** Un succès planétaire limité à quatre plantes
Cécile Klingler

86 **ENTRETIEN AVEC DAVID DEMORTAIN**
« Les éléments scientifiques resteront un argument solide »
Propos recueillis par Vincent Glavieux

89 **L'ŒIL DE L'ÉCONOMISTE** Un marché complètement modifié
Aline Fugeray-Scarbel et Stéphane Lemarié

92 guide

92 **LIVRES** La sélection du mois

96 **AGENDA** Les manifestations scientifiques

98 **LA QUESTION DE LA FIN**
Pourquoi le temps passe-t-il de plus en plus vite ?
Gautier Cariou

www.larecherche.fr

RECHERCHER
Les archives du magazine
Les sujets qui vous intéressent dans une base de plus de 20 000 articles.

S'INFORMER
L'actualité de la recherche
Retrouvez le blog des livres et l'agenda des manifestations scientifiques.

ACHETER
Abonnement et vente d'anciens numéros
Livres sélectionnés par *La Recherche*
Les outils du chercheur.

***La Recherche* sur Twitter... Rejoignez-nous sur Twitter pour un éclairage original sur la science et les technologies. http://twitter.com/maglarecherche**

Ce numéro comporte deux encarts abonnement *La Recherche* sur les exemplaires kiosque France et étranger (hors Suisse et Belgique), un encart abonnement Edigroup sur les exemplaires kiosque Suisse et Belgique,

FLORENCE HAUDIN/ESPCI - MAKS NARODENKO / SHUTTERSTOCK

ils ont participé à ce numéro

Karim Benchenane

NEUROSCIENTIFIQUE

Au sein de l'unité plasticité du cerveau à l'ESPCI ParisTech, Karim Benchenane est responsable de l'équipe qui mène des recherches sur l'influence des différents états de vigilance et des oscillations cérébrales dans le traitement des informations et leur mémorisation. ■

Fabian Brau

PHYSICIEN

Docteur en physique théorique et chercheur dans l'unité de chimie physique non linéaire à l'université libre de Bruxelles, Fabian Brau étudie les mécanismes de l'émergence spontanée de formes complexes et leurs manifestations dans différents systèmes, à l'image des rides de la peau et des plis géologiques. ■

Julyan Cartwright

PHYSICIEN

Julyan Cartwright, docteur en physique théorique, dirige des recherches à l'Institut andalou des sciences de la Terre de Grenade. Il analyse les mécanismes de formation de structures et motifs, leur auto-organisation et leur auto-assemblage, notamment dans des systèmes naturels tels que les jardins chimiques. ■

Marie-Christine de La Souchère

PROFESSEURE

Agrégée de physique, Marie-Christine de La Souchère enseigne au lycée Jean-Baptiste-Say, à Paris. Elle partage sa passion des sciences en cultivant l'approche historique et l'anecdote. Son dernier livre, *Les Sciences et l'Art*, vient de paraître chez Ellipses. ■

Anne De Wit

PHYSICO-CHIMISTE

Docteur en chimie, Anne De Wit est professeure à l'université libre de Bruxelles où elle dirige l'unité de chimie physique non linéaire. Son groupe de recherche analyse les motifs et les dynamiques spatio-temporelles dues à l'interaction entre des réactions chimiques et des phénomènes de transport. ■

Aline Fugeray-Scarbel

INGÉNIEURE AGRONOME

Au sein du laboratoire d'économie appliquée de Grenoble, Aline Fugeray-Scarbel travaille sur les impacts économiques des innovations dans différentes filières de production agricole. Elle étudie de manière empirique leurs conséquences pour les différents acteurs. ■

Florence Haudin

PHYSICIENNE

Florence Haudin a effectué un postdoctorat dans l'unité de chimie physique non linéaire à l'université libre de Bruxelles entre 2011 et 2014. Elle étudie divers phénomènes aux interfaces comme le couplage entre une réaction de précipitation et un écoulement en milieu confiné ou la propagation d'ondes de surface. ■

Stéphane Lemarié

ÉCONOMISTE

Directeur de recherche Inra au Laboratoire d'économie appliquée de Grenoble, Stéphane Lemarié travaille depuis le début de sa carrière sur le secteur de l'agrofourniture. Il a codirigé, avec Aline Fugeray-Scarbel, l'ouvrage *Impacts des OGM sur les exploitations agricoles* (La Documentation française, 2014). ■

Xavier Nissan

BIOLOGISTE

Titulaire d'un doctorat de biologie cellulaire et moléculaire portant sur le traitement des pathologies de la peau, Xavier Nissan dirige depuis 2010 l'équipe des maladies du vieillissement à l'I-Stem d'Evry, le plus grand laboratoire français de recherche et développement dédié aux cellules souches humaines. ■

Adrien Peyrache

NEUROSCIENTIFIQUE

En 2010, la Société française des neurosciences attribue à Adrien Peyrache le prix de la meilleure thèse pour ses travaux sur l'effet du sommeil dans la mémoire chez la souris. Après cinq ans de recherche à l'université de New York, il rejoindra cet été l'université McGill, au Canada. ■

WILLIAM PARRA - DR - CHRISTOPHE HARGOUES

Par les créateurs de

UN JOUR SUR TERRE et PLANÈTE BLEUE

"Une série qui captivera petits et grands"
LE MONDE

"Des images rares et impressionnantes"
LE FIGARO

Cette nouvelle série documentaire produite par **BBC** et diffusée sur **FRANCE 5**, nous offre le spectacle à la fois grandiose et terrifiant des chasses des animaux sauvages. Grâce aux caméras **HD ultra-performantes** qui captent le moindre détail avec une précision spectaculaire, PRÉDATEURS est une réussite incontestable.

Film : © 2015 BBC Worldwide Ltd.

EXTRAIT

SCIENCES ET AVENIR

EN **3 DVD** ET **2 BLU-RAY**

PARTOUT ET SUR **WWW.KOBAFILMS.FR**

BBC earth

koba FILMS

Adresse électronique : courrier@larecherche.fr

PALÉONTOLOGIE

ÉVOLUTION ET RÉGRESSION

La conclusion de l'article « Joindre la parole à l'outil » (hors-série *La Recherche* n° 17, p. 70) m'amène à me demander : est-ce le langage, la fabrication d'outils ou la transmission culturelle qui a joué le rôle le plus significatif dans notre processus d'évolution ?

Courriel de Serge Marty

Réponse de Thierry Chaminade, neuroscientifique **Deux conceptions de l'évolution peuvent être distinguées pour l'homme. L'apparition des aptitudes humaines s'est-elle faite de manière graduelle et continue, selon la vision classique de l'évolution (darwinisme), ou peut-on imaginer un événement unique, un « saut » évolutif majeur à l'origine de la spécificité de la cognition humaine (saltationnisme) ? Les deux théories sont à l'œuvre sur différentes échelles de temps, mais on peut poser l'hypothèse d'un « saut » pour l'homme qui explique plusieurs, voire tous les aspects de son comportement qui lui sont uniques, comme la fabrication d'outils, le langage ou la transmission culturelle. Plusieurs hypothèses sont envisagées et testées : l'article montrait que la capacité de structurer de manière hiérarchique des actions est commune au langage et à la fabrication d'outils. D'autres travaux portent sur la transmission culturelle.**

PESTICIDES : OBJECTIF IRRÉALISTE ?

L'une des affirmations de Jean-Charles Bocquet (*La Recherche* n° 509, p. 42) est curieuse : *« Réduire de moitié l'emploi des pesticides avant 2025 me paraît inatteignable, si on souhaite garder les rendements agricoles. »* J'aimerais savoir comment il aboutit à cette conclusion. En effet, nombre de travaux signalent l'appauvrissement de nos sols, en raison notamment d'un usage abusif de pesticides et d'engrais chimiques. Or, selon Jean-Charles Bocquet, il faudrait soigner le mal qu'on a provoqué en prolongeant sa cause, en espérant que le problème se résolve de lui-même.

Courriel de Anneline Siwiec

Réponse de Jean-Charles Bocquet, président du lobby européen des fabricants de pesticides European Crop Protection Association **Il s'agit ici de savoir si les objectifs affichés par le plan Ecophyto 2 – réduire le recours aux produits phytosanitaires de 50 % en France d'ici à 2025 – sont atteignables. L'utilisation de ces produits a déjà baissé de 50 % entre la fin des années 1990 et 2010, passant de 120 000 tonnes de substances actives à un peu plus de 60 000 tonnes. Cela a été possible grâce aux efforts des agriculteurs, des techniciens et conseillers agricoles, et des industriels, avec des produits plus ciblés, à plus faible dose. Lors du premier plan Ecophyto, nous avions indiqué que réduire de 50 % les utilisations entre 2008 et 2018 n'était pas possible. Les résultats ont montré que nous avions raison. Il en est de même pour le plan Ecophyto 2, car il faut plus de dix ans pour trouver des solutions, y compris en biocontrôle. Le ministère de l'Agriculture a fixé un objectif arbitraire et politique, mais les choses se passent sur le terrain, et nous y travaillons tous.**

PHYSIQUE

REPRÉSENTER LE PHOTON

La découverte des ondes gravitationnelles (*La Recherche* n° 509, p. 16) m'inspire cette réflexion : la compréhension des phénomènes physiques est simplifiée par le fait qu'ils sont faciles à observer ou à se représenter. Le photon est une exception. Y a-t-il un consensus sur une représentation du photon qui rende compte de toutes ses propriétés ?

Courriel de Bernard Bertrand

Réponse de Philippe Grangier et Jean-François Roch, physiciens **Le photon est une excitation élémentaire du champ électromagnétique quantifié. Intuitivement, on peut considérer la lumière comme une onde électromagnétique classique. Dans une description quantique, cette onde a une structure qui définit un « mode du champ électromagnétique ». L'énergie de ce mode est quantifiée : elle ne peut prendre que certaines valeurs bien précises, multiples du quantum d'énergie. Ce quantum est le photon. Si le mode contient un seul photon, le comportement de la lumière ne peut pas être décrit classiquement. À l'inverse, si le mode contient un grand nombre de photons, la lumière se comporte presque comme une onde classique.**

Sauf mention contraire de leur auteur, toute lettre parvenue à la rédaction de *La recherche* est susceptible d'être éditée et publiée, en tout ou en partie, dans le journal. Les lettres concernant un auteur extérieur à la rédaction de *La Recherche* lui sont envoyées. Sans réaction de l'auteur dans un délai raisonnable, nous les considérons comme publiables en tout ou en partie, sans attendre une éventuelle réponse de sa part. Dans la mesure du possible, évitez les fax et les lettres manuscrites.

THOMSON REUTERS

ENDNOTE™

STRUCTURER ET ORGANISER VOS SOURCES : ENDNOTE.

L'OUTIL DE RÉFÉRENCEMENT N°1 POUR LES CHERCHEURS

Depuis la version Mac® ou Windows® ou depuis la version en ligne, EndNote vous aide à collecter vos références pour rédiger votre recherche à publier plus rapidement. Que vous mettiez à jour un CV académique ou un programme d'enseignement, que vous envoyiez des demandes de financement ou écriviez un manuscrit, EndNote® vous apporte les outils pour organiser et partager votre recherche où que vous soyez. Votre travail gagne ainsi en efficacité.

Venez découvrir les nouveautés EndNote à partir de la version X7.5 sur ritme.com

RITME SCIENTIFIC SOLUTIONS

Distributeur officiel en France, Belgique, Luxembourg et Suisse

RITME
34, bd Haussmann - 75009 Paris - France
Tél. : +33 (0) 1 42 46 00 42 **www.ritme.com**

© 2016 RITME. EndNote est une marque déposée de Thomson Reuters.

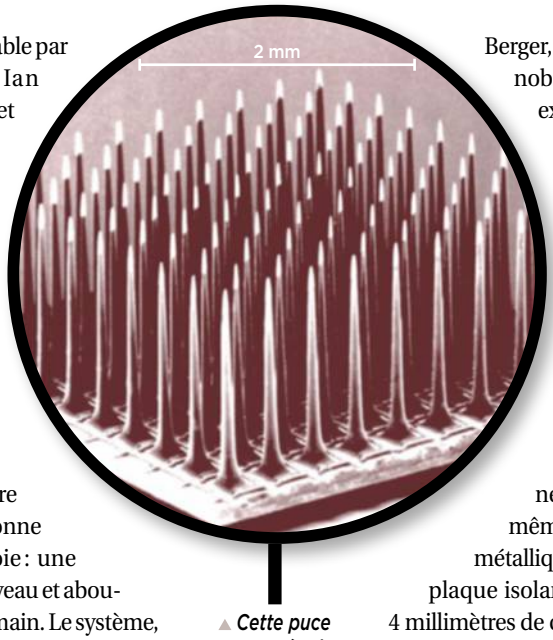
Paralysé, il retrouve l'usage de ses doigts

Une dérivation nerveuse artificielle a permis à un tétraplégique de stimuler les muscles de sa main droite par la pensée. Une prouesse qui confirme le potentiel des interfaces cerveau-machine.

Anne Debroise, journaliste

Propulsé contre un banc de sable par une mauvaise vague, Ian Burkhart s'est brisé le cou, et la 5e vertèbre, le 13 juin 2010. Instantanément paralysé, il doit la vie à ses amis qui le sortent de l'eau. Pourtant, en 2016, il a partiellement retrouvé l'usage de ses doigts. Il réussit même à jouer à un jeu vidéo de guitare (1). Il ne s'agit pas d'un miracle, mais bien d'une prouesse psychologique et scientifique : Ian contrôle ses doigts grâce à son cerveau. Les signaux électriques émis par ses neurones, qui ne peuvent plus être transmis par les nerfs lésés de la colonne vertébrale, empruntent une autre voie : une dérivation électronique qui part du cerveau et aboutit aux muscles de son poignet et de sa main. Le système, baptisé NeuroLife, a été mis au point par une équipe de l'organisme de recherche Battelle, aux États-Unis, en collaboration avec des médecins et des neurologues de l'université de l'Ohio.

« C'est tout simplement la première fois que l'on propose une interface cerveau-machine qui se révèle utile aux tétraplégiques, qu'ils soient paralysés à cause d'une maladie dégénérative ou d'un accident », résume François Berger, de l'Institut des neurosciences de Grenoble. L'approche de l'équipe américaine exploite au maximum les capacités physiologiques des patients, en ne suppléant que ce qui leur fait réellement défaut : la continuité nerveuse. La dérivation suppose de réaliser trois étapes : la récolte de la commande électrique, sa conversion en commande nerveuse et la stimulation neuromusculaire.



▲ *Cette puce composée de 100 électrodes est placée dans le cerveau de Ian Burkhart, au niveau du cortex moteur.*

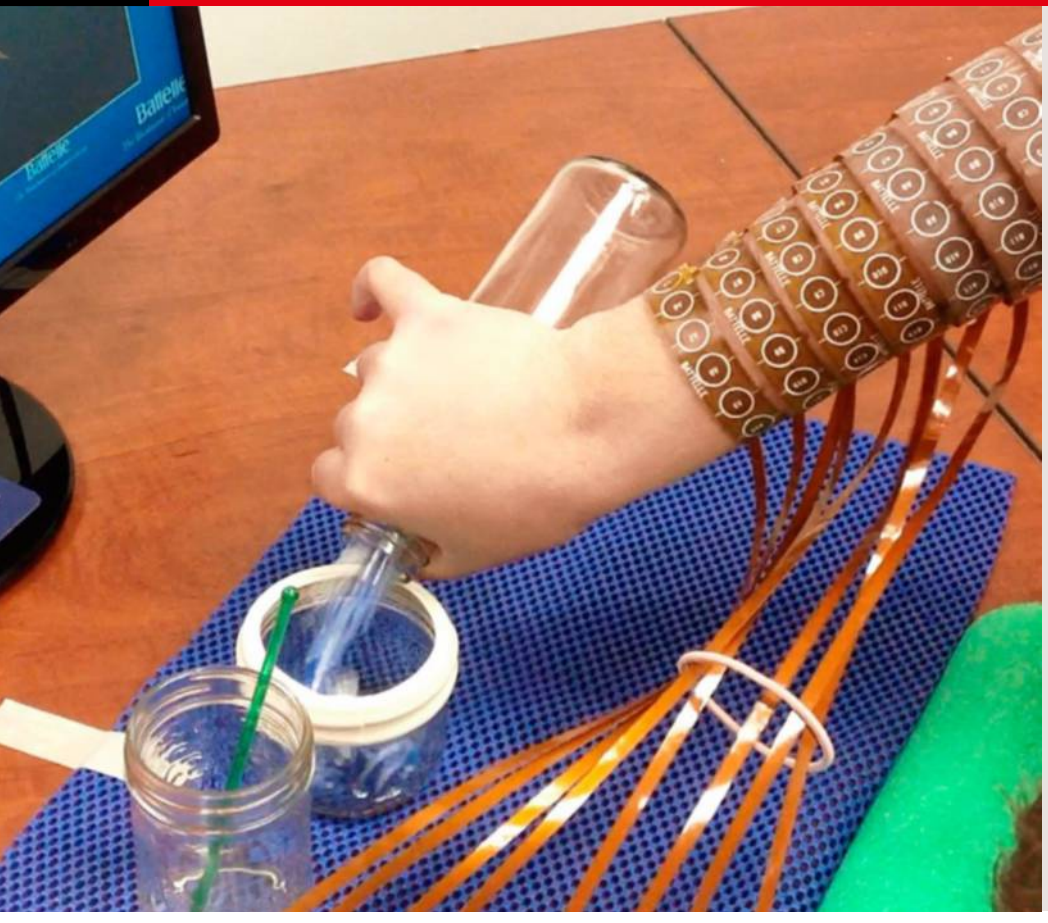
La première étape est assurée par un réseau de microélectrodes qui récolte les signaux nerveux auprès des neurones qui les émettent, à l'intérieur même du cerveau. Il s'agit de 100 électrodes métalliques, fichées par rangées de 10 dans une plaque isolante (un composite verre/silicone) de 4 millimètres de côté. Le système a été inventé dans les années 1990 par le bio-ingénieur Richard Normann, de l'université d'Utah aux États-Unis, avec l'idée de stimuler le cortex visuel de personnes aveugles pour qu'ils recouvrent la vue. Mais sa rencontre avec un neuroscientifique de l'université américaine Brown va changer les choses.

John Donoghue est spécialisé dans les interfaces homme-machine. Il utilise les électroencéphalo-

RICHARD A. NORMANN - DR

Repères

- **Un jeune Américain, paralysé à la suite d'un accident, a subi une opération en 2014 au cours de laquelle un implant d'une centaine d'électrodes a été introduit dans son cerveau, au niveau du cortex cérébral.**
- **Après une phase d'entraînement, un programme informatique a été capable de décoder les signaux cérébraux spécifiques de certains mouvements.**
- **Le patient a pu alors stimuler sa main droite par la pensée et retrouver une certaine mobilité.**



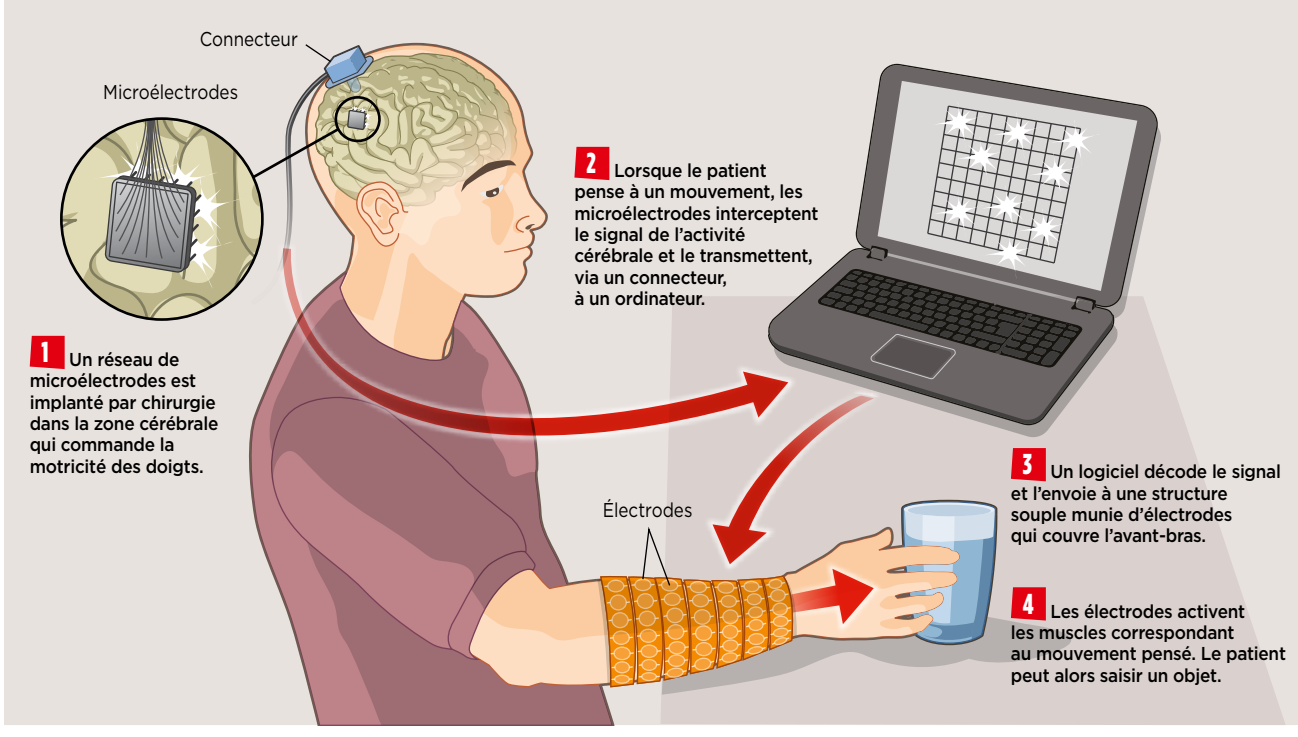
▲ *Saisir une bouteille, verser son contenu dans un récipient, glisser une carte de crédit dans un distributeur ou même jouer à un jeu vidéo de guitare : Ian Burkhart, tétraplégique, a réussi à exécuter tous ces mouvements grâce à un implant cérébral relié à des électrodes fixées sur l'avant-bras.*

OHIO STATE UNIVERSITY WEXNER MEDICAL CENTER/BATELLE

grammes pour récolter les résidus de l'activité neuronale à la surface du crâne, et contrôler des ordinateurs ou des bras robotisés. Mais ce signal, brouillé et atténué par l'os du crâne, est difficile à interpréter. Une multiélectrode insérée dans le cerveau, telle celle de l'université d'Utah, pourrait se révéler beaucoup plus efficace… même si elle ne perçoit que l'activité de 10 à 30 neurones. Les deux hommes s'associent. *« Nous nous sommes rendu compte que l'information n'est pas cloisonnée, mais largement répartie à travers le cerveau,* explique John Donoghue. *Cela signifie que l'on peut extraire une grande quantité d'information d'une toute petite zone cérébrale, ce qui permet en principe d'exploiter la multiélectrode. »* Cette exploitation constitue la deuxième étape de la dérivation. Qui n'a rien d'évident : *« En réalité,* poursuit John Donoghue, *nous ne comprenons pas grand-chose au langage du cerveau. Il est très complexe d'extraire une information pertinente des signaux électriques que l'on récolte. Ceux-ci changent continuellement et les neurones n'émettent pas toujours le même type de signal pour effectuer un mouvement donné. »* Avec son équipe, il met donc au point des algorithmes capables de s'adapter à la versatilité du langage neuronal et d'identifier, dans la multitude de signaux perçus, des motifs caractéristiques d'une commande motrice. Avec succès : en 2002, il apprend à un singe équipé de la multiélectrode d'Utah à déplacer un curseur sur un écran à la seule force de sa pensée (2).

C'est un travail similaire de décryptage du langage neuronal qu'effectue un autre ingénieur, Chad Bouton, au sein de l'organisation de recherche privée Battelle. Lui aussi a adopté la multiélectrode cérébrale d'Utah (la seule autorisée alors dans le cadre d'essais cliniques aux États-Unis). Mais il se fixe un objectif différent : redonner aux patients l'usage de leurs propres membres. Il élabore pour cela un système de stimulation neuromusculaire inspiré des appareils que les kinésithérapeutes posent sur la peau des sportifs ou des malades en •••

Fig. 1 Une dérivation électronique entre le cerveau et la main


Connecteur
Microélectrodes
1 Un réseau de microélectrodes est implanté par chirurgie dans la zone cérébrale qui commande la motricité des doigts.
2 Lorsque le patient pense à un mouvement, les microélectrodes interceptent le signal de l'activité cérébrale et le transmettent, via un connecteur, à un ordinateur.
3 Un logiciel décode le signal et l'envoie à une structure souple munie d'électrodes qui couvre l'avant-bras.
Électrodes
4 Les électrodes activent les muscles correspondant au mouvement pensé. Le patient peut alors saisir un objet.

••• réhabilitation pour contracter les fibres musculaires. Il a ainsi intégré 130 électrodes dans des rubans souples destinés à être enroulés autour de l'avant-bras.

NEURONES MIROIRS

Reste à trouver un volontaire… La tâche n'est pas simple : ce dernier ne doit pas présenter de maladies en dehors de sa paralysie, ne pas être équipé d'un autre système électronique, il doit être si possible jeune, et paralysé depuis peu afin que ses muscles et son système nerveux ne soient pas trop atrophiés par le manque de pratique. Mais surtout, il doit être prêt à subir deux opérations du cerveau, l'une pour poser la multiélectrode, l'autre pour la retirer, sans attendre beaucoup de bénéfice personnel : au mieux, il pourra, pendant les six mois prévus pour l'essai clinique, mouvoir quelques doigts de la main droite. Ian Burkhart remplit tous les critères. Il souffre d'une lésion de la moelle épinière à la limite des deux vertèbres cervicales C5 et C6. Il conserve du coup un mouvement des épaules, du coude, une mobilité partielle du poignet, mais ses doigts sont totalement immobilisés.

Ian est opéré en avril 2014 par le neurochirurgien Ali Rezai, du centre médical Wexner de l'Ohio. La multiélectrode doit être placée le plus précisément possible sur la zone qui commande la motricité des doigts. Celle-ci a été préalablement identifiée par imagerie cérébrale. L'IRM fonctionnelle permet d'observer les zones du cerveau activées quand une personne effectue une action ou un raisonnement. Le patient ne pouvant pas bouger les doigts, les médecins exploitent l'étrange faculté des neurones miroirs : ces neurones s'activent aussi bien quand une personne agit que quand elle imagine le mouvement ou l'observe chez quelqu'un d'autre. La multiélectrode est donc placée au cœur de la zone qui s'active dans le cortex moteur primaire gauche quand Ian observe des vidéos de mouvements de doigts de la main droite. Elle est connectée, via une sorte de prise électrique qui émerge du crâne, à un ordinateur qui va traiter le signal.

Il faudra des semaines de travail à l'algorithme pour apprendre à extraire des commandes du galimatias de signaux nerveux capté par la multiélectrode. Et des semaines d'entraînement à Ian Burkhart, appuyé par une équipe de psychologues et de physiothérapeutes, pour apprendre à contrôler sa pensée en s'aidant de vidéos qui lui montrent les mouvements à réaliser. Les séances de trois et quatre heures, ponctuées de phases de repos, se succèdent à raison de deux à trois par

INFOGRAPHIE : BRUNO BOURGEOIS

semaine. Elles s'accompagnent de rééducation musculaire pour que le patient regagne un peu de la force dans la main. Deux mois après l'opération, les premiers résultats arrivent : Ian parvient à ouvrir et fermer le poing.

LA FIN DES BRAS ROBOTISÉS

L'équipe a sélectionné six mouvements précis (flexion et extension du poignet, flexion et extension du pouce, etc.) et des mouvements combinés plus complexes. Leur réalisation, avec une intensité adéquate, nécessitera plus de quinze mois de travail, et donc un allongement de l'essai. Chad Bouton précise : *« Ian a appris à se saisir d'une bouteille, verser son contenu dans un verre, poser la bouteille, saisir un bâton mélangeur (ce qui implique un contrôle fin de la fermeture des doigts), remuer le contenu du verre par au moins deux mouvements circulaires, et déposer le bâtonnet dans une carafe. »* Il peut aussi saisir un téléphone et le porter à son oreille, ou tenir une cuillère, des gestes qu'il ne pouvait pas exécuter avant (3). *« Je n'aurais pas cru que ça pouvait fonctionner aussi bien,* avoue François Berger. *Cette expérience périme complètement les essais avec les bras robotisés. On écoute enfin les patients, qui ne courent pas après la technologie, mais veulent surtout pouvoir se servir de leur main. »*

Avec cet essai concluant, Chad Bouton a apporté la preuve que les interfaces cerveau-machine ont de l'avenir. Un avenir que chacun décrit à sa manière. Le bio-ingénieur américain attend beaucoup des améliorations que son équipe apporte au logiciel capable de décoder les signaux et rendre la commande plus intuitive et plus variée. D'autres parient sur le sans-fil, grâce à des électrodes qui communiqueraient avec l'ordinateur par ondes radio. C'est le cas d'Alim-Louis Benabid, fondateur de Clinatec, un pôle de recherche grenoblois qui lance actuellement un essai clinique avec des exosquelettes soutenant bras et jambes, commandés par la pensée. Les électrodes sont en outre insérées à la surface du crâne, ce qui répond au problème lancinant des électrodes intracérébrales, qui perdent leur efficacité avec le temps, soit parce qu'elles se déplacent, soit parce qu'elles s'enveloppent d'un tissu cicatriciel.

Enfin, à l'Institut des neurosciences de Grenoble, au sein de l'unité Inserm 1205 dirigée par François Berger, Blaise Yvert cherche à faire communiquer la multiélectrode de l'Utah avec un synthétiseur vocal. Il redonnerait ainsi la parole à ceux qui souffrent des formes les plus sévères de paralysie, notamment du syndrome d'enfermement (appelé « locked-in syndrome »). ■

(1) tinyurl.com/naturevideo-TheNerveBypass

(2) M.D. Serruya *et al., Nature, 416,* 141, 2002.

(3) C. E. Bouton *et al., Nature,* doi :10.1038/nature17435, 2016.

Pour en savoir plus

- **tinyurl.com/inserm-fr-icm** L'interface cerveau-machine ou « agir par la pensée », un dossier de l'Inserm.
- **tinyurl.com/colloque-medecine-regenerative** Colloque à l'Académie des sciences, en mars 2016, « La médecine régénérative : peut-on réparer un cerveau lésé ? » avec des vidéos et des interventions.

Trente ans d'interfaces cerveau-machine

Commander une machine par la pensée : depuis trente ans, cette perspective fait régulièrement la une des magazines. Dans les années 1980, on pensait y parvenir en récoltant l'activité électrique résiduelle à la surface du cerveau, grâce à l'électroencéphalographie (EEG). Le premier succès de cette démarche a été signé par Stevo Bozinovski, de l'université de Skopje, en Yougoslavie, qui, en 1988, réussit à démarrer et à stopper le trajet d'un robot par la pensée. *« Mais l'EEG est difficile à exploiter,* note François Berger, de l'université de Grenoble. *Elle ne capte que les résidus, en deux dimensions, d'une activité cérébrale en trois dimensions. Le signal est en plus déformé et atténué par la traversée de l'os du crâne. »*

D'où l'intérêt des électrodes intracérébrales utilisées dans une succession d'expériences autour des années 2000. Dès 1998, le neurologue américain Philip Kennedy annonçait avoir implanté une électrode unique dans le cerveau d'un homme tétraplégique à la suite d'un accident vasculaire cérébral. Le volontaire, qui ne s'exprimait qu'en clignant des yeux, réussit à déplacer un curseur sur un écran et à choisir ainsi des lettres dans un alphabet. L'année suivante, Miguel Nicolelis, neuroscientifique à l'université Duke, aux États-Unis, entraînait un rat à actionner un bras robotique pour obtenir à boire. En 2003, un singe réalisait le même exploit à l'université d'Arizona. Enfin, en 2004, l'équipe de John Donoghue équipait l'Américain Matthew Nagle d'une multiélectrode cérébrale. Devenu tétraplégique à la suite d'une agression, le jeune homme parvint à déplacer un curseur sur un écran d'ordinateur, avec une aisance inédite. Suivent une dizaine d'années au cours desquelles les capacités de traitement du signal augmentent considérablement, et les algorithmes deviennent plus performants. En 2012, l'équipe de John Donoghue décrit les performances d'une femme paralysée à la suite d'un accident vasculaire cérébral, Cathy Hutchinson. Équipée d'une multiélectrode, elle commande par la pensée un bras robotisé (posé à côté d'elle) qui lui sert à boire (1).

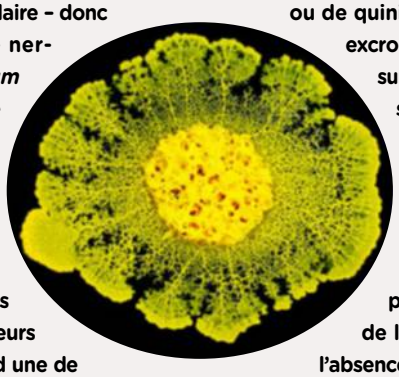
Après l'invention des multiélectrodes intracérébrales, l'histoire des interfaces cerveau-machine serait donc en train de connaître une deuxième rupture importante. Il s'agit désormais de rendre aux paralysés l'usage de leur propre corps…

(1) L.R. Hochberg *et al., Nature, 485,* 372, 2012.

COGNITION

APPRENDRE SANS CERVEAU

Peut-on apprendre sans cerveau ? Des biologistes ont démontré que oui. Ils se sont intéressés aux capacités d'apprentissage d'un organisme unicellulaire – donc dépourvu de système nerveux – nommé *Physarum polycephalum*. Cette cellule géante qui vit dans les sous-bois est dotée d'excroissances qu'elle utilise pour se nourrir et qu'elle peut déployer sur des surfaces pouvant atteindre plusieurs mètres carrés. Or, quand une de ces excroissances rencontre une substance inconnue sur son chemin vers une source de nourriture, elle a tendance à se rétracter. Les biologistes ont cherché à savoir si l'organisme est capable de changer ce comportement de méfiance, et donc d'apprendre. Pour cela, ils ont déposé différentes substances répulsives mais inoffensives entre ces organismes et une source de nourriture avant d'observer leur réaction. Résultat : en présence de caféine ou de quinine sur leur chemin, les excroissances minimisent leur surface de contact avec ces substances amères. Mais après six jours, les organismes s'y habituent et apprennent à les ignorer. Si bien que leurs excroissances se déploient vers la nourriture de la même manière qu'en l'absence de toute substance. Un organisme dépourvu de cerveau peut donc apprendre… à s'habituer !



R. Boisseau *et al*, *Proceedings of the Royal Society B*, doi:10.1098/rspb.2016.0446, 2016.

▲ *La cellule géante*
Physarum polycephalum.

BIOLOGIE

LA MEMBRANE NUCLÉAIRE SE CASSE ET SE RÉPARE

Lorsqu'une cellule se faufile dans un passage étroit, l'enveloppe de son noyau est cassée puis réparée. C'est la première fois que ce phénomène est identifié en dehors de la division cellulaire. Pour le démontrer, l'équipe de Matthieu Piel, à l'Institut Curie, a étudié in vitro la migration de cellules immunitaires humaines et de cellules cancéreuses à travers un conduit artificiel long d'une quinzaine de micromètres et large de 2 micromètres. Grâce à des marqueurs fluorescents, les biologistes ont pu observer que lorsque la cellule s'engage dans le conduit, la pression mécanique déclenche la formation de cloques au niveau de la membrane nucléaire, essentiellement à l'extrémité avant du noyau. Cette rupture libère parfois un peu de chromatine dans le cytoplasme. Mais à la sortie du conduit, la membrane nucléaire est rapidement rescellée.

M. Raab *et al.*, *Science*, doi:10.1126/science.aad7611, 2016.

CLIMAT

L'ÉTÉ DE PLUS EN PLUS PRÉCOCE

Entre les années 1960 et 2000, le début de l'été météorologique a avancé de dix jours. C'est la conclusion à laquelle sont parvenus deux climatologues français, à partir de données d'observation. Selon eux, la variabilité interne et naturelle du climat ne suffit pas à expliquer ce phénomène. En effet, le forçage anthropique est en grande partie responsable de cette avancée. La période estivale pourrait encore commencer dix jours plus tôt en 2100 dans le scénario le plus fort envisagé par le Giec (RCP 8.5), c'est-à-dire si rien n'est fait pour atténuer le réchauffement climatique. Soit vingt jours plus tôt que durant l'ère préindustrielle.

C. Cassou et J. Cattiaux, *Nature Climate Change*, doi:10.1038/nclimate2969, 2016.

PALÉONTOLOGIE

L'HISTOIRE GÉNÉTIQUE DES EUROPÉENS

Sommes-nous tous les descendants des premiers Européens qui sont arrivés sur le continent il y a 45 000 ans ? Non, selon l'analyse génétique de 51 génomes d'humains modernes qui ont vécu il y a entre 45 000 et 7 000 ans. Cette analyse montre au contraire que cette migration initiale a peu contribué au patrimoine génétique de la population européenne contemporaine. Notre origine remonterait à un groupe d'humains qui vivaient au nord-ouest de l'Europe, il y a environ 35 000 ans. Par ailleurs, la proportion néandertalienne de notre génome est passée de 3 à 6 % il y a 45 000 ans à 2 % aujourd'hui.

Qiaomei Fu *et al.*, *Nature*, doi:10.1038/nature17993, 2016.

▲ ***Ces crânes, retrouvés en République tchèque, ont environ 31 000 ans.***

MARTIN FROUZ - JIRI SVOBODA - AUDREY DUSSUTOUR (CNRS)

“NOUS PRÉVOYONS D’ENVOYER LA CAPSULE INHABITÉE DRAGON VERS MARS DÈS 2018”

SPACE X
Message du 27 avril
sur le compte Twitter de la société
fondée par Elon Musk.

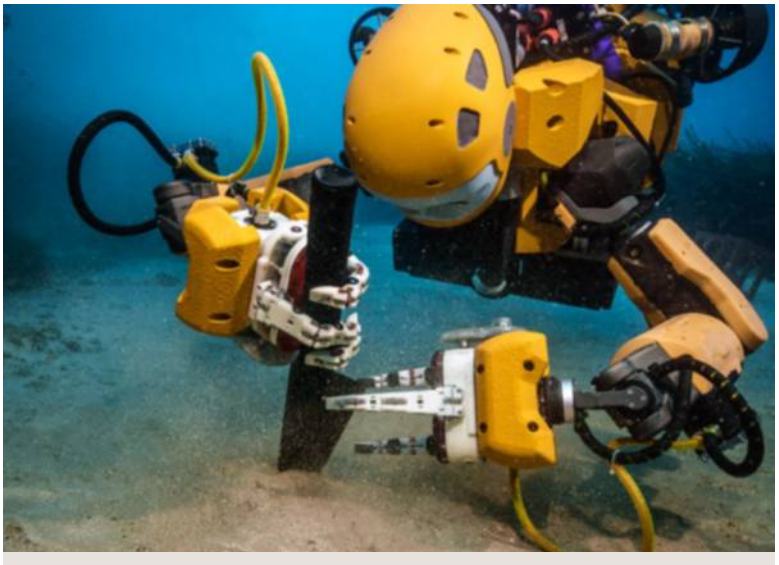
3 890

TIGRES vivent actuellement dans leur habitat naturel. Une bonne nouvelle, car c’est la première fois depuis cent ans que ce chiffre est en augmentation. En 2010, on n’en comptait que 3200.
Fonds mondial pour la nature (WWF) et Global Tiger Forum.

PHYSIQUE

2018 sera quantique

La Commission européenne lancera un programme de recherche sur les technologies quantiques en 2018. Son ampleur (objectifs scientifiques, financement…) sera comparable aux projets phares – *flagships* – sur le graphène et la simulation du cerveau initiés en 2013.
tinyurl.com/flagship-quantique



OSADA/SEGUIN/DRASSM

UN ROBOT RÉVOLUTIONNE L’ARCHÉOLOGIE SOUS-MARINE

▲ Grâce à Ocean One, tout nouveau robot humanoïde conçu par Oussama Khatib, de l’université Stanford, les archéologues pourraient bientôt manipuler de leur bateau des vestiges archéologiques comme s’ils étaient au fond de l’eau. Bardé de capteurs, dont une caméra stéréo qui restitue une vision 3D, Ocean One est connecté à une interface haptique, qui permet à un humain de le contrôler et surtout de restituer les efforts perçus par le robot quand il manipule un objet sous l’eau. Le 15 avril, l’équipe de Michel L’Hour, directeur du Département des recherches archéologiques subaquatiques et sous-marines, l’a testé avec succès sur La Lune, *un vestige de la flotte de Louis XIV, gisant par 91 mètres de fond, près de Toulon.*

ASTRONOMIE

UNE LUNE ACCOMPAGNE LA PLANÈTE NAINE MAKÉMAKÉ

Le télescope spatial Hubble a détecté un satellite autour de la planète naine Makémaké. Avec Pluton et Éris, Makémaké est un des plus grands objets connus de la ceinture de Kuiper, ce vaste réservoir de corps glacés situé au-delà de Neptune. Cette lune, la première que l’on découvre à cette planète naine, mesure environ 160 kilomètres de diamètre et fait le tour de sa planète en une douzaine de jours.
hubblesite.org/newscenter/archive/releases/2016/18

“Aujourd’hui, je dirais que la génétique sert surtout à comprendre, bien plus qu’à donner la réponse thérapeutique”
Arnold Munnich,
pédiatre et généticien,
dans *Libération* du 28 avril.

PHYSIQUE

LE MOTEUR À UN ATOME

Le premier moteur thermique à un atome est né. Alternativement soumis à une source froide (laser) puis chaude (champ électrique), l’atome se met à osciller et produit de l’énergie mécanique. Par rapport au poids, la puissance est semblable à celle d’une voiture, mais son efficacité est très faible (0,28 %).
Johannes Roßnagel *et al.*, *Science*, *352*, 325, 2016.

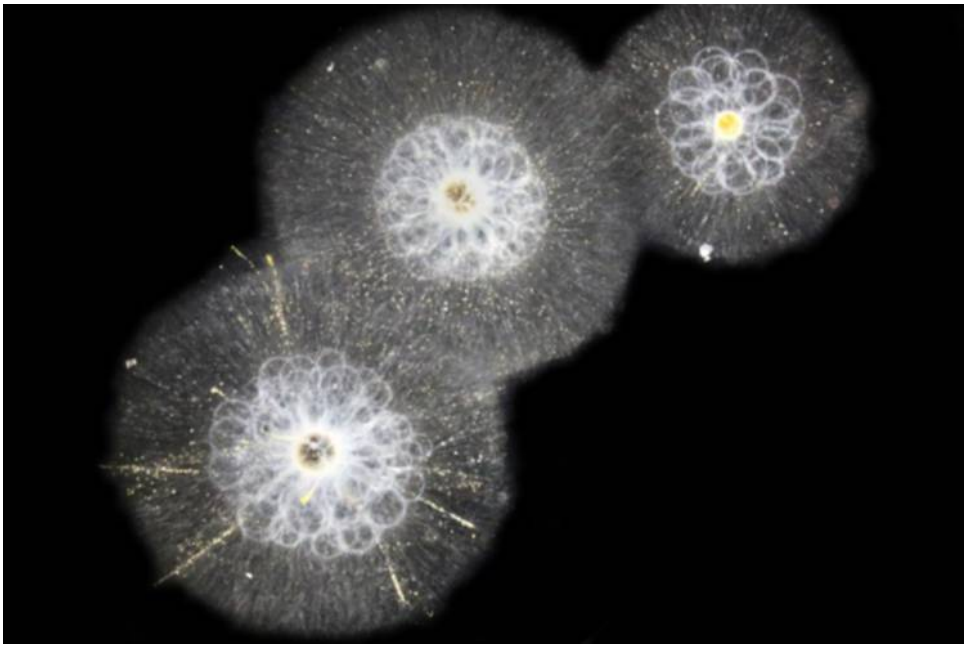
Du zooplancton qui pèse lourd

La quantité des Rhizaria, groupe de zooplancton de grande taille, dans les océans du globe avait jusqu'ici été sous-estimée. Ces organismes semblent pourtant prendre une part importante au flux de carbone des océans.

Un groupe de plancton s'est jusqu'ici montré si discret que les biologistes et océanographes avaient sous-estimé sa teneur dans les océans du globe. Baptisé Rhizaria, il rassemble des espèces de zooplancton dont certains organismes peuvent atteindre 1 centimètre de diamètre. Selon une nouvelle estimation, les Rhizaria pèsent lourd dans les océans puisqu'ils représentent 5,2 % de la biomasse totale, allant des bactéries aux baleines (1).

« Ces organismes sont connus depuis des centaines d'années mais ils sont très fragiles car la plupart n'ont pas de squelette externe, explique David Caron, océanographe à l'université de Californie du Sud. *La méthode habituelle de collecte du plancton avec des filets les endommage, ce qui empêchait jusqu'ici d'évaluer correctement leur abondance. »*

Pour contourner cette difficulté, une équipe de chercheurs français et allemands a analysé un total de 1,8 million d'images obtenues in situ à l'aide d'une caméra immergée et déployée jusqu'à 500 mètres de profondeur. Les images ont été récoltées lors de 11 campagnes océanographiques, dont la récente expédition Tara Océans, couvrant l'ensemble des mers. Le décompte des Rhizaria a permis d'estimer leur quantité mais ce chiffre est probablement inférieur à la réalité. *« Cette méthode nous a seulement permis d'identifier les organismes d'un diamètre supérieur à 0,6 millimètre,* note Fabrice Not, coauteur de l'étude. *Or on sait qu'il existe des Rhizaria de plus petite taille. »*



▼ *Plusieurs campagnes océanographiques ont permis d'estimer que les Rhizaria comptent pour 5,2 % de la biomasse totale des océans.*

TRISTAN BIARD, STATION BIOLOGIQUE DE ROSCOFF (CNRS/UPMC)

PIÈGES À CARBONE

Autre information révélée par l'étude : la répartition des Rhizaria n'est pas homogène. Ces organismes sont plus nombreux dans les eaux chaudes intertropicales et au centre des océans, des zones pauvres en éléments nutritifs mais qui contiennent des micro-algues qui font la photosynthèse. Vivant en symbiose avec les Rhizaria, elles leur apportent les nutriments nécessaires pour coloniser ces environnements hostiles.

Ces résultats rejoignent ceux d'une autre étude, publiée dans le même numéro de la revue *Nature*, qui suggère que ce groupe participe pour une part non négligeable au piégeage du carbone (2). *« Les Rhizaria ne seraient donc pas seulement abondants, ils semblent participer aussi au flux de carbone. Piégé dans les particules détritiques émises par ce groupe, le carbone tombe probablement au fond des océans où il se retrouve séquestré pour des milliers d'années »*, pointe David Caron.

Oriane Dioux

(1) T. Biard *et al.*, *Nature*, *532*, 504, 2016.
(2) L. Guidi *et al.*, *Nature*, *532*, 465, 2016.

Des traces radioactives de supernovae sur Terre

La présence au fond des océans d'un isotope du fer suggère que notre planète a pu être bombardée par des particules radioactives émanant d'explosions d'étoiles en fin de vie.

D'où peuvent bien provenir certaines traces radioactives découvertes dans des roches et des sédiments prélevés au fond des océans Atlantique, Pacifique et Indien ? Pour l'équipe internationale de chercheurs dirigée par Anton Wallner, de l'université nationale australienne, le fer 60 (*) arrive directement de supernovae qui ont arrosé la Terre au cours des dix derniers millions d'années (1).

Lorsqu'une étoile arrivée en fin de vie explose en supernova, elle disperse tout autour d'elle un nuage de matière constituée d'éléments radioactifs. Transportés dans le milieu interstellaire à l'intérieur de grains de poussière, ces éléments peuvent atteindre la Terre si celle-ci se trouve dans le « voisinage » de l'explosion (à quelques centaines d'années-lumière). En théorie, il suffit de détecter dans une roche un excès d'un ou plusieurs de ces éléments et de dater la couche où ils se trouvent pour remonter à la supernova. C'est précisément ce qui a été fait en 1999 : du fer 60, identifié sur le plancher océanique du Pacifique, a été attribué à une supernova survenue il y a 2 millions d'années environ. L'origine stellaire de cet isotope (*) rare du fer ne fait aucun doute : sa demi-vie (*) de 2,6 millions d'années est bien trop courte pour qu'il soit issu de la formation de la Terre datant de près de cinq milliards d'années. Aujourd'hui, Anton Wallner et ses collègues livrent une analyse beaucoup plus précise de ce dépôt de fer 60 sur Terre. À partir de 120 échantillons de fonds marins collectés cette fois sur l'ensemble du globe, ils ont mis en évidence deux pics : un premier s'étalant de 1,7 à 3,2 millions d'années et un second de 6,5 à 8,7 millions d'années. « *Ces deux intervalles prolongés laissent penser qu'il y a eu au cours de chacune de ces périodes non pas un événement unique, mais une série de supernovae successives* », note Caroline Fitoussi, du laboratoire de géologie de Lyon.

DEUX DÉPÔTS DE FER LAISSENT PENSER QU'IL Y A EU UNE SÉRIE DE SUPERNOVAE SUCCESSIVES

Cette conclusion est confortée en partie par le travail d'une équipe de l'université technique de Berlin, en Allemagne. Dieter Breitschwerdt et ses collègues ont utilisé une autre approche pour déterminer la source de ces supernovae. Pour cela, ils ont modélisé la « Bulle locale », une zone de gaz chaud s'étendant sur 600 années-lumière et dans laquelle baigne le Système solaire. Selon eux, cette bulle aurait été créée par une vingtaine de supernovae situées dans un amas d'étoiles qui a, depuis, dérivé et est sorti de cette zone. Leur étude suggère que deux de ces supernovae étaient suffisamment proches pour avoir contribué à la présence de fer 60 sur Terre : la première il y a 2,3 millions d'années et la seconde il y a 1,5 million d'années ; toutes deux se trouvant alors à 300 années-lumière environ de notre planète (2). Des dates et des distances en accord avec celles calculées par la première équipe.

Ces explosions ont-elles pu avoir un impact sur Terre ? Certaines théories suggèrent que l'afflux de particules énergétiques éjectées par les supernovae pourrait avoir augmenté la couverture nuageuse, refroidissant ainsi la surface terrestre. Cette hypothèse est renforcée par le fait que ces explosions ont eu lieu il y a 2,5 millions d'années environ, à une époque où notre planète se refroidissait et passait du Pliocène au Pléistocène. De nouveaux forages océaniques couvrant des périodes de temps plus longues pourraient peut-être dans le futur donner du poids à cette idée.

Julien Bourdet

(1) A. Wallner *et al.*, *Nature*, *532*, 69, 2016.
(2) D. Breitschwerdt *et al.*, *Nature*, *532*, 73, 2016.

100 000 à 400 000

ANS, c'est la durée estimée de voyage du fer des supernovae proches jusqu'à la Terre.

(*) **Le fer 60** est l'un des trois isotopes radioactifs du fer ; le fer 56, avec 26 protons et 30 neutrons, est l'isotope stable le plus courant.

(*) **Les isotopes** sont les différentes formes d'un élément chimique qui se distinguent par le nombre de neutrons contenus dans leur noyau.

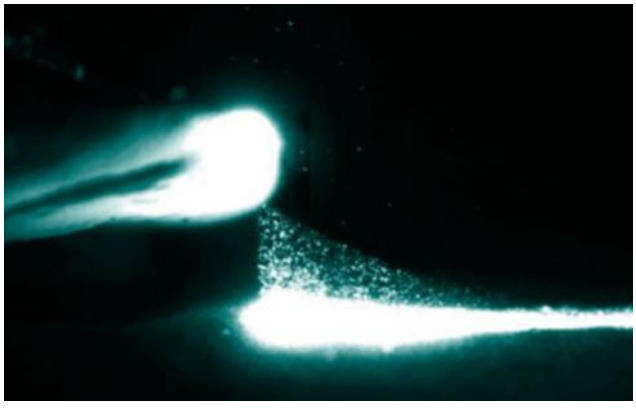
(*) **La demi-vie** (ou période) d'un élément radioactif est la durée au bout de laquelle la moitié des noyaux se sont désintégrés.

Le courant d'air qui disperse les spores des champignons

Pour multiplier leurs chances de se reproduire, les champignons à chapeau créent un courant d'air froid qui aide les spores à s'envoler le plus loin possible.

Le mécanisme de reproduction des champignons à chapeau, ou basidiomycètes, est connu depuis longtemps : leurs spores sont éjectées du chapeau puis dispersées grâce au vent. Sauf que la plupart de ces champignons, poussant les uns sur les autres, font plutôt obstacle au vent.

Partant de ce constat, les équipes de Marcus Roper, de l'université de Californie à Los Angeles, et d'Émilie Dressaire, de l'université de New York, ont imaginé un autre mécanisme (1). Pour le démontrer, les chercheurs ont utilisé deux espèces de champignons : les shiitakes et les pleurotes en huître. Et constaté qu'en isolant un champignon coupé des courants d'air extérieurs, à distance d'un substrat, les spores ne se sont pas contentées de tomber sous le chapeau mais se sont déposées à distance.



▲ *L'éclairage par un rayon laser permet de visualiser les spores d'un champignon shiitake dispersées par le courant d'air créé par le chapeau.*

Que s'est-il passé ? Le champignon est froid – la température à la surface du chapeau est inférieure de 4 degrés environ à celle de l'air ambiant, ce qui densifie l'atmosphère alentour. « *L'eau qui s'évapore du chapeau refroidit l'air en créant un courant froid qui descend le long du pied puis part horizontalement, et entraîne les spores. Un phénomène renforcé par l'asymétrie du chapeau* », explique Émilie Dressaire. « *À partir d'observations simples, dont tout le monde a pu faire l'expérience, ces travaux arrivent à des conclusions très importantes, et mettent au jour un mécanisme dont on ignorait l'existence. Cela explique aussi pourquoi ces champignons ont un tel besoin d'eau* », s'enthousiasme Marc-André Selosse, du Muséum national d'histoire naturelle, à Paris.

Prochaine étape pour aller encore plus loin dans la compréhension de ce mécanisme. « *Maintenant, nous cherchons notamment à comprendre l'effet de l'humidité ambiante sur le taux d'évaporation, et ses conséquences sur la dispersion des spores* », précise Émilie Dressaire. **Bérénice Robert**

(1) É. Dressaire *et al.*, *PNAS*, doi:10.1073/pnas.1509612113, 2016.

Échange de carbone entre arbres adultes

Grâce à un réseau symbiotique, les arbres adultes échangent du carbone. Un phénomène jusqu'ici inconnu.

À l'origine, l'expérience (1) menée par Christian Körner, de l'université de Bâle, en Suisse, et son équipe avait pour but de tester la réponse des arbres à un taux élevé de CO_2 dans l'atmosphère. Pour cela, « *dans une forêt suisse, cinq grands épicéas ont été reliés à des tubes émettant continuellement du CO_2 isotopiquement différent sur leurs branches,* explique Tamir Klein, coauteur de l'étude. *Ce marquage permet de suivre son parcours des feuilles aux racines* ». Et là, surprise : du carbone modifié a été retrouvé dans les plus petites racines des arbres voisins, à un taux allant jusqu'à 40 %. Un transfert effectué grâce aux mycorhizes, symbioses entre les racines des arbres et des champignons du sol. Selon Marc-André Selosse, du Muséum national d'histoire naturelle, à Paris, « *on savait que les jeunes plantes se servaient de ces réseaux mycorhiziens pour se nourrir grâce aux arbres adultes. Mais de tels échanges n'avaient pas été démontrés entre arbres adultes* ». Chaque arbre recevant autant de CO_2 qu'il en donne, le spécialiste s'interroge sur l'intérêt écologique d'un tel échange. « *Dès qu'un stress apparaît,* répond Tamir Klein, *les arbres connectés entre eux via la mycorhize pourraient avoir un avantage sur ceux qui ne comptent que sur leur propre ressource de carbone.* » **B. R.**

(1) T. Klein *et al.*, *Science*, *352*, 342, 2016.

UNIVERSITY OF CALIFORNIA, DEPARTMENT OF MATHEMATICS

Prochainement en kiosque et sur smartphone

Télécharger dans l'App Store

DISPONIBLE SUR Google play

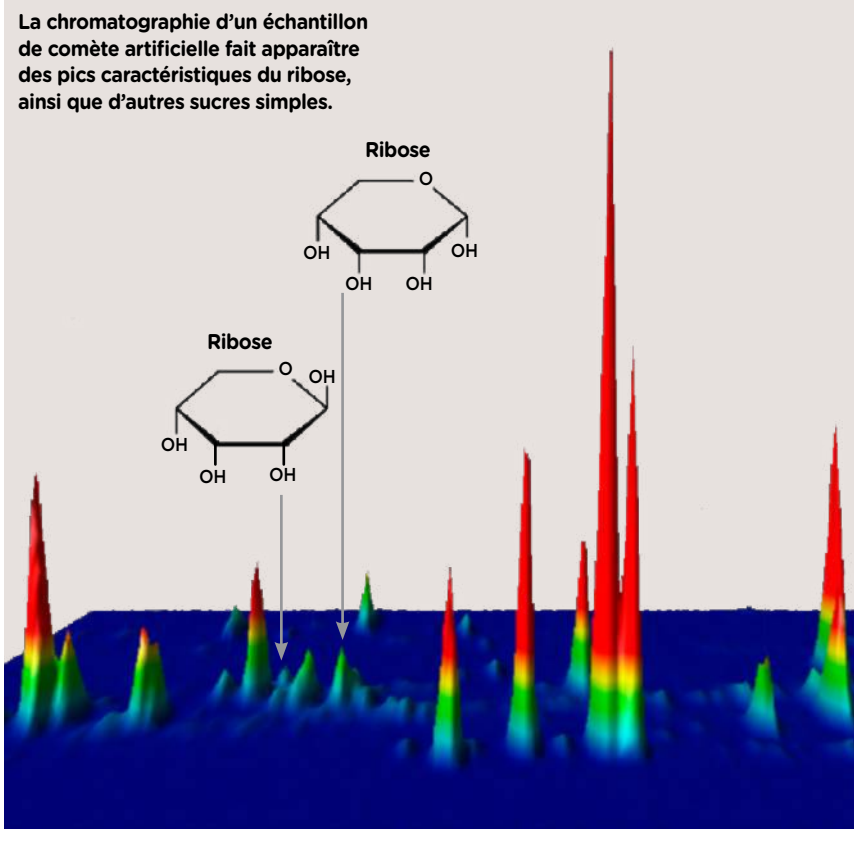
Une comète artificielle très sucrée

Pour pallier le problème d'accessibilité des comètes… il suffit de les reconstituer en laboratoire ! Une équipe française vient d'y détecter des sucres, et notamment du ribose, élément crucial dans l'aventure du vivant.

Les sucres ne sont pas seulement des molécules sources d'énergie, certains jouent un rôle bien plus central dans l'intimité du vivant. Le ribose, en particulier, constitue le squelette de l'ARN (acide ribonucléique), ce polymère qui porte des fragments du code génétique de tous les êtres vivants. Il joue un rôle d'intermédiaire entre l'ADN, une molécule plus robuste qui stocke à long terme le code génétique, et les protéines qui assurent l'intendance dans la cellule. Or, une hypothèse très en vogue veut que la vie telle qu'on la connaît, reposant sur le trio ADN – ARN – protéines, a été précédée par une période où l'ARN tenait seul ces trois rôles. On parle du « monde à ARN ».

Mais pourquoi faudrait-il que ce sucre essentiel à la vie soit venu du ciel ? *« On connaît mal les conditions sur Terre à l'époque »*, explique Louis d'Hendecourt, de l'Institut d'astrophysique spatiale, à Orsay. Cosignataire de l'article que le magazine *Science* vient de publier (1), c'est lui qui a fabriqué le modèle de comète. *« On ne sait pas si les sucres pouvaient s'y former facilement ou non. Cependant, on sait que la formation de sucres n'est pas du tout évidente dans l'eau liquide. »* Laquelle a pourtant joué un rôle essentiel par la suite. *« En revanche,* poursuit le chercheur, *on comprend de mieux en mieux comment des sucres ont pu se former dans la glace, sur les comètes, très tôt dans l'histoire du système solaire. On se retrouve donc devant une hypothèse très séduisante : les sucres – et d'autres briques du vivant – se forment dans la glace des comètes, tombent sur notre planète et, dans un deuxième temps, le processus d'apparition de la vie se poursuit, cette fois dans l'eau liquide. »*

Or, on sait que juste avant l'apparition de la vie, il y a près de 4 milliards d'années, la Terre a fait l'objet d'un intense bombardement de comètes et d'astéroïdes, porteurs de briques du vivant. Depuis cinquante ans, les preuves s'accumulent… En 1970, l'analyse de la météorite de Murchison, tombée en Australie, révèle la présence de 18 acides aminés, les pièces détachées des protéines. En 2009, on trouve l'acide aminé glycine dans les poussières récoltées autour de la comète Wild-2 en 2004 et ramenées sur Terre par la sonde Stardust. Depuis, bien d'autres molécules organiques ont été détectées, et l'on pense désormais que des sucres sont sans doute venus de la même manière de l'espace.

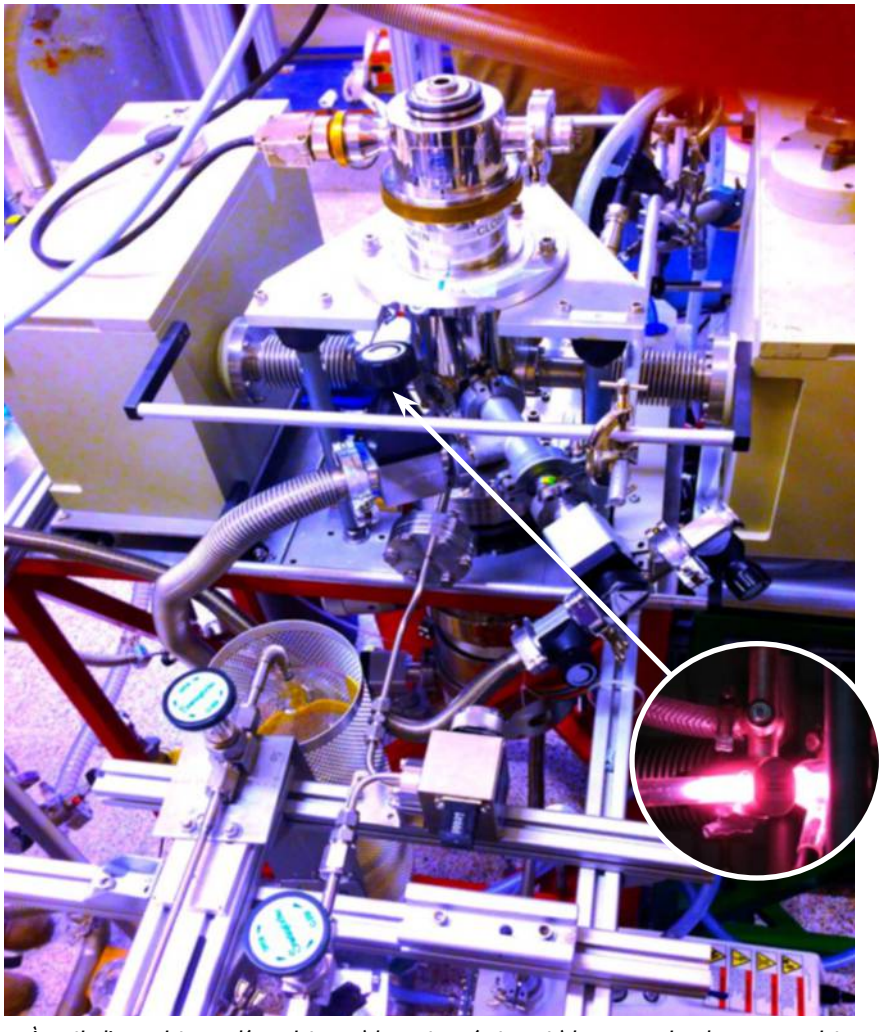


La chromatographie d'un échantillon de comète artificielle fait apparaître des pics caractéristiques du ribose, ainsi que d'autres sucres simples.

CORNELIA MEINERT

CULTURE DE GRAINS COMÉTAIRES

Pour fabriquer des grains de pseudo-comète, Louis d'Hendecourt est parti d'un mélange de trois molécules : eau, méthanol et ammoniac. Dans les proportions 10 – 3,5 – 1. Une version simplifiée de la composition présumée des « poussières d'étoile » qui ont constitué le protosystème solaire. Dans une enceinte maintenue à une température de – 195 °C et une pression



▲ *À partir d'une mixture gelée maintenue à basse température et à basse pression dans une enceinte à Orsay, on simule la formation des grains de poussière enrobés de glace, matière première des comètes. La mixture est irradiée six jours durant à l'aide de rayonnement ultraviolet (zoom).*

UWE MEIERHENRICH

d'un dix millionième de millibar, cette mixture gelée est ensuite exposée pendant six jours à un puissant rayonnement UV, puis pendant deux heures à un rayonnement synchrotron. Cela pour simuler les deux grandes formes d'énergie susceptibles, au cours de la formation du système solaire, d'avoir favorisé l'évolution chimique des grains cométaires. Le produit de ces manipulations a ensuite été ramené à la température ordinaire et transporté d'Orsay à Nice pour y être analysé.

C'est Cornelia Meinert, à l'Institut de chimie de Nice, qui a réalisé l'analyse. « *Nous avons tout d'abord utilisé une technique qui consiste à transformer un peu ces molécules pour les rendre plus volatiles : la "dérivatisation"*, précise-t-elle. *Le produit – volatile – de cette réaction peut alors être analysé par la chromatographie en phase gazeuse, à l'aide d'un spectromètre de masse capable de séparer un grand nombre de molécules similaires en fonction de leur masse. Nous avons ainsi détecté du ribose, mais aussi de l'arabinose, du xylose, du lyxose… et encore bien d'autres sucres.* »

« *Des résultats très intéressants,* commente Grégoire Danger, de l'université d'Aix-Marseille, qui travaille également sur des modèles cométaires. *L'équipe niçoise a travaillé avec un mélange de seulement trois molécules (eau, méthanol et ammoniac). La suite va consister à complexifier ce modèle. On aimerait notamment voir ce qui se passe quand on ajoute des molécules comme le CO_2 ou le CO, et étudier les interactions avec des minéraux comme les silicates, que l'on trouve également sur les comètes.* »

EN ATTENDANT DES PREUVES

Nicolas Biver, de l'Observatoire de Paris, apprécie lui aussi ces résultats récents. « *Mais certains de leurs résultats divergent des mesures que notre équipe a réalisées en janvier 2015 en observant par spectrométrie à l'aide du radiotéléscope millimétrique de Pico Valeta en Espagne la comète C/2014 Q2 (Lovejoy) lors de son passage au plus proche du Soleil. Ainsi, nous avons détecté le duo classique glycolaldéhyde (le plus simple des sucres) et éthylène glycol, dans un rapport de 1 à 4 environ* (2). *Curieusement, l'équipe niçoise mesure sur son modèle artificiel ces mêmes composés dans un rapport inverse de 4 à 1.* »

« *C'est une vraie performance,* estime Hervé Cottin, de l'université Paris-Est Créteil. *Bien sûr, ces résultats ne prouvent pas formellement que du ribose est produit sur les vraies comètes. Ni même que toutes les comètes ont la même composition. Mais ils permettent d'avancer.* »

La mission japonaise Hayabusa 2, partie en 2014, doit rapporter en 2020 des échantillons de l'astéroïde Ryugu. La mission Osiris-Rex de la Nasa doit partir en septembre 2016 et rapporter en 2023 un échantillon de l'astéroïde Bennu. Les deux astéroïdes sont présumés riches en composés organiques. Deux occasions d'en savoir encore plus sur ces sucres venus de l'espace et qui ont peut-être façonné la chimie de la vie sur Terre.

Pierre Vandeginste

(1) C. Meinert *et al., Science, 352,* 208, 2016.
(2) N. Biver *et al., Science Advances, 1,* e1500863, 2015.

Pour en savoir plus

■ J.-O. Baruch, « La vie a commencé avec l'ARN », *La Recherche, 437,* janvier 2010, p. 58.

Un nouveau mécanisme pour expliquer la formation des nuages

Des physico-chimistes ont mis en évidence le rôle de composés qui diminuent l'énergie nécessaire pour maintenir une goutte d'eau liquide et la faire grossir.

▲ *Les nuages ne sont pas composés seulement de vapeur d'eau. De multiples particules, naturelles ou issues de la pollution humaine, peuvent faciliter leur formation.*

Percer les secrets des cumulus et des nimbus est un enjeu de taille pour les scientifiques. Car, en plus de son rôle en météorologie et dans le cycle de l'eau, la couverture nuageuse est le paramètre responsable de la plupart des incertitudes dans les modèles de changement climatique. Ces limites sont dues à la complexité des calculs numériques, mais les processus physico-chimiques à la base de la formation des gouttes de nuages restent l'objet de débat. Dans un article publié dans la revue *Science* (1), des chercheurs de l'université de Californie à Berkeley soulignent l'importance des effets de tension de surface dans la croissance des gouttelettes d'eau. Les masses d'air chaud gorgées de vapeur d'eau commencent à remonter en se refroidissant. Pour que la vapeur devienne liquide, la pression alentour doit atteindre la valeur dite « pression de vapeur saturante ». Mais ce changement d'état ne suffit pas, car former une goutte coûte de l'énergie. La présence de particules d'aérosols de tailles et d'origines diverses (pollens, poussières désertiques, cendres, pollution, etc.) facilite le processus en servant de noyau autour duquel l'eau se condense. À ce mécanisme physique s'ajoutent deux effets chimiques, théorisés dès les années 1930 par le météorologue suédois Hilding Köhler. D'une part, l'effet Raoult, par lequel certains composés organiques dissous dans la goutte abaissent la pression de vapeur saturante, empêchant ainsi toute évaporation. D'autre part, l'effet de tension de surface qui fait jouer à certaines molécules tels les sulfates le rôle de surfactants (*). Ces molécules diminuent l'énergie nécessaire pour maintenir la goutte et la faire grossir. *« Lorsque les particules sont de taille inférieure au micromètre, ces effets chimiques sont déterminants sur la formation de la goutte,* explique Barbara Nozière, de l'Institut de recherches sur la catalyse et l'environnement de Lyon. *Mais autant l'importance de l'effet Raoult est désormais reconnue, autant l'effet de tension de surface est négligé par une partie de la communauté scientifique. Une des raisons est que les instruments majoritairement utilisés ne détectent pas ces molécules de surfactants et leurs effets. »*

ÉTUDE DE CROISSANCE EN LABORATOIRE

L'idée des physico-chimistes a été d'utiliser un instrument de leur cru pour mesurer la croissance de gouttelettes en laboratoire. *« Nous avons observé des gouttes trop grosses pour être expliquées seulement par l'effet Raoult »*, détaille Christopher Ruehl, premier auteur de l'article. *« J'espère que cet article va convaincre la communauté »*, confie Barbara Nozière, dont l'équipe élabore des méthodes de mesure, dans l'atmosphère, des concentrations et des effets des surfactants (2). Des travaux qui pourront confirmer les études en laboratoire. **Sylvain Guilbaud**

(1) C.R. Ruehl *et al., Science, 351,* 1447, 2016.
(2) V. Gérard *et al., Environmental Sc. & Techno., 50,* 2974, 2016.

(*) **Un surfactant,** ou tensioactif, est un composé qui modifie la tension superficielle – l'énergie de surface – entre deux milieux.

BRIGITTE MERLE/PHOTONONSTOP

Le VIH résiste aux mutations induites

Une mutation de l'ADN viral provoquée par CRISPR-Cas9 ne suffit pas à bloquer la prolifération de virus.

Ce qui ne tue pas le virus le rend plus fort… Manipuler sa séquence génétique n'aboutit pas systématiquement à sa destruction. C'est la mauvaise surprise de l'expérience faite par une équipe de virologues de l'université McGill, à Montréal, sur le virus du sida (VIH) (1).

Lorsque le VIH infecte une cellule, la séquence génétique virale s'insère de façon permanente dans l'ADN de la cellule. Les traitements permettent aujourd'hui de contrôler l'infection, mais ils ne peuvent pas éliminer cette séquence. Elle est donc susceptible de proliférer. D'où l'idée d'utiliser les récentes techniques d'ingénierie du génome, telle CRISPR-Cas9, capables de couper l'ADN à des endroits spécifiques, pour faire disparaître cette menace.

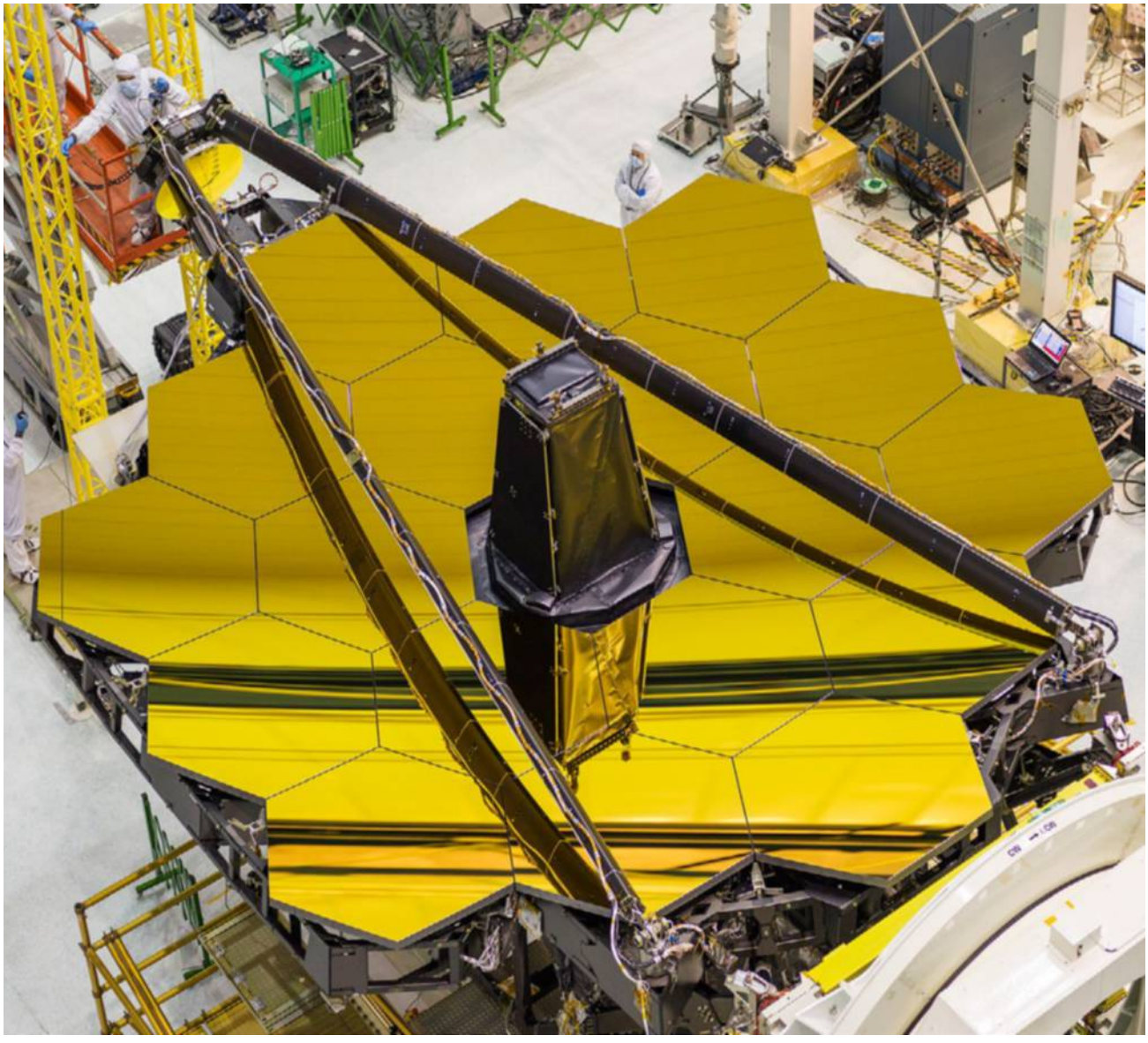
MAUVAISE RÉPARATION

Pleine d'espoir, l'équipe canadienne a expérimenté cette technique sur des cellules immunitaires humaines. Mises en culture in vitro, ces cellules ont été modifiées en y introduisant les outils nécessaires pour modifier l'ADN viral : un ARN guide fait pour reconnaître une séquence génétique du VIH, et l'enzyme Cas9 capable de couper l'ADN. La cassure de l'ADN est ensuite recollée par un mécanisme naturel mais sans que celui-ci ne restaure l'ADN à l'identique. Autrement dit, il reste une mutation dans la séquence virale du VIH, susceptible de la rendre inopérante.

Pour vérifier si cette inactivation fonctionne, une culture de cellules modifiées a été infectée par des VIH. Au bout de trente-six heures, le nombre de cellules infectées était effectivement réduit. Mais certaines continuaient à produire des virus, preuve que l'ADN viral n'avait pas toujours été rendu inactif. Pourquoi ces virus ont-ils échappé au traitement ? En séquençant ces derniers, les virologues ont observé qu'ils étaient porteurs de mutations inexistantes au début de l'expérience. *« La surprise vient du fait que la plupart de ces mutations acquises par le virus correspondent à l'endroit où Cas9 coupe l'ADN,* explique Chen Liang, responsable de l'étude. *Certaines mutations sont minuscules – un seul nucléotide – mais cela modifie la séquence de sorte que l'association de l'ARN guide et de Cas9 ne peut plus la reconnaître et la couper. Et comme elles ne nuisent pas au virus, il continue à se répliquer. »*

Mathias Germain

(1) Z. Wang *et al., Cell Reports, 15,* 481, 2016.



CHRIS GUNN/NASA

Le successeur de Hubble prend forme

Après des années de tergiversations et de retard, la situation commence à se dénouer pour le James-Webb Space Telescope (JWST), successeur tant attendu du télescope spatial Hubble. Son miroir primaire de 6,5 mètres de diamètre, formé de 18 segments hexagonaux recouverts d'or, vient d'être terminé. Projet amorcé dès les années 1990, ses caractéristiques ont fluctué sur le plan technique. Son diamètre initial devait être de 4 mètres (contre 2,4 mètres pour Hubble), avant d'être porté à 8 mètres. Puis on s'est aperçu qu'un tel diamètre nécessitait une fusée spécifique, de sorte qu'il a été révisé à la baisse. Le JWST reste néanmoins l'un des projets les plus ambitieux de la Nasa en astrophysique. Observant dans l'infrarouge et hors des turbulences de l'atmosphère terrestre – et loin de la pollution lumineuse –, il sera idéal pour repérer les objets les plus faibles et les plus lointains du cosmos. Au programme : l'observation des premières étoiles et galaxies de l'Univers, la recherche de signes de vie dans les atmosphères d'exoplanètes ou des mécanismes de la naissance des étoiles dans les galaxies. Lancement prévu en 2018.

Philippe Pajot

« Une pensée abstraite peut exister indépendamment du langage »

Les mathématiciens pensent-ils de la même façon que les littéraires ? Pour en avoir le cœur net, il suffit de regarder quelles aires cérébrales sont activées lorsqu'ils réfléchissent à des concepts mathématiques.

La Recherche En enregistrant l'activité cérébrale de mathématiciens en train de réfléchir, vous avez révélé un réseau neuronal spécifique à la pensée mathématique (1). Comment avez-vous procédé ?

Marie Amalric Nous avons recruté une quinzaine de mathématiciens confirmés, tous docteurs ou agrégés, et une quinzaine de non-mathématiciens (enseignants et chercheurs en lettres). Puis nous avons comparé l'activité de leur cerveau alors qu'ils étaient soumis à un test, allongés dans un appareil d'imagerie par résonance magnétique (IRM), un casque audio sur les oreilles. Une voix préenregistrée leur énumérait une série d'affirmations. Ils disposaient alors de quelques secondes entre chaque phrase pour appuyer sur un bouton et ainsi signifier si les affirmations leur paraissent vraies, fausses ou absurdes. La plupart étaient d'ordre mathématique et quelques-unes de culture générale. Parmi elles, se glissaient des affirmations dénuées de sens, du type « le drapeau de la pomme de terre a été guillotiné à la fin du concile de Trente ».

Qu'avez-vous observé ?

Pour les affirmations d'ordre mathématique, les non-mathématiciens ne comprennent pas la signification des phrases, si bien qu'ils activent les mêmes aires cérébrales que lorsqu'ils entendent des affirmations absurdes. Les mathématiciens, eux, mobilisent des régions cérébrales pariétales, frontales et temporales inférieures des deux hémisphères qui ne recouvrent pas les aires du langage. Ces réseaux avaient déjà été identifiés comme liés à nos compétences numériques et spatiales.

Qu'est-ce que ce résultat nous apprend ?

Jusque-là, seules des tâches mathématiques simples comme le calcul mental avaient été testées. Pour la première fois, nous avons évalué les régions cérébrales mobilisées pour des mathématiques de haut niveau. Or l'origine de notre capacité d'abstraction mathématique est sujette à débat. Le linguiste américain Noam Chomsky soutient que cette faculté est apparue consécutivement au langage et en mobiliserait donc les réseaux neuronaux. Selon une autre hypothèse, cette capacité repose sur les circuits cérébraux impliqués dans notre représentation des nombres et de l'espace. Notre étude appuie donc la seconde hypothèse selon laquelle une pensée abstraite peut exister indépendamment du langage. Ce résultat corrobore ainsi l'impression d'Albert Einstein qui affirmait : *« Les mots ou le langage, écrit ou parlé, ne semblent jouer aucun rôle dans les mécanismes de ma pensée. »*

> **« POUR LA PREMIÈRE FOIS, NOUS AVONS ÉVALUÉ LES RÉGIONS CÉRÉBRALES MOBILISÉES POUR DES MATHÉMATIQUES DE HAUT NIVEAU »**

Est-ce à dire que le langage ne joue pas de rôle dans l'apprentissage des mathématiques ?

Non, il y a fort à parier que le langage joue un rôle important au cours de l'acquisition des concepts mathématiques. En revanche, on peut supposer qu'une fois acquis, ils sont encodés de manière abstraite, symbolique. Ce sont alors les aires cérébrales liées aux compétences numériques et spatiales, et non celles du langage, qui s'activent.

Propos recueillis par Gautier Cariou

(1) M. Amalric et S. Dehaene, *PNAS*, doi:10.1073/pnas.1603205113, 2016.

DR

▲ *Marie Amalric, doctorante en neurosciences*

DATES CLÉS

2009 Entrée à l'École normale supérieure, à Paris.
2013 Prix du meilleur projet de fin d'étude, délivré par l'École nationale supérieure de techniques avancées ParisTech Alumni.
DEPUIS 2013 Doctorante au centre de neuro-imagerie cérébrale NeuroSpin, à Gif-sur-Yvette, sous la direction de Stanislas Dehaene.

Pour en savoir plus

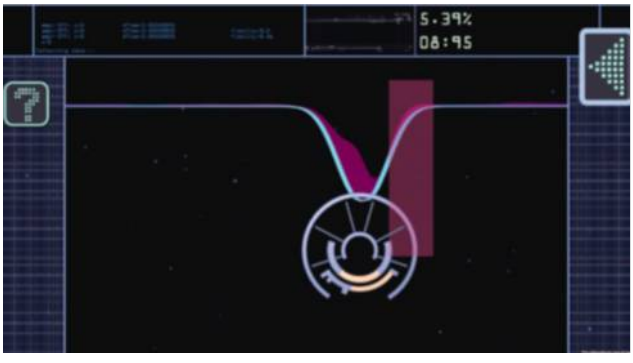
■ Stanislas Dehaene, *La Bosse des maths - Quinze ans après*, Odile Jacob, 2010.

Des internautes jouent à améliorer un ordinateur quantique

Pas facile de déplacer un café sans le renverser. Mais nous avons tous appris à le faire. Notre capacité à résoudre ce type de problème permet de régler un ordinateur quantique mieux que des algorithmes.

« *Au départ, notre équipe travaillait sur un projet d'ordinateur quantique. Nous étions loin de prévoir que nous finirions par demander au public comment il fallait déplacer des atomes pour qu'il marche* », assure Klaus Mølmer, du département de physique et d'astronomie de l'université d'Aarhus, au Danemark. C'est pourtant ce qu'il raconte dans l'article qu'il a cosigné et qui a récemment paru dans la revue *Nature* (1).

Dans ce prototype danois, l'information est portée par des atomes isolés et, à un moment donné, il faut rapprocher un atome d'un autre. « *On utilise un faisceau laser,* explique Klaus Mølmer, *qui agit un peu comme un minuscule récipient.* » L'atome, lui, se conduit comme l'eau dans la bassine pleine que l'on déplace. Quantique oblige, l'atome n'est jamais vraiment ici ou là mais « probablement » quelque part. Un geste trop brusque, et il passe par-dessus bord. C'est donc d'un mouvement preste mais retenu qu'il faut le déplacer pour le rapprocher de l'autre. Toujours pour ces raisons quantiques, il ne faut pas traîner en route. Même avec les meilleurs logiciels connus, le résultat obtenu a été décevant. Les physiciens danois décident alors de construire un jeu simulant leur problème. Ils lancent *Quantum Moves* sur le Web avec la consigne : « *Pour aider la science, déplacez le verre d'eau sans le faire déborder.* » (2) Surprise : les meilleurs joueurs, des personnes sans bagage en physique, font mieux que les algorithmes.



▲ *Le but du jeu : déplacer rapidement une cuvette remplie de liquide sans en renverser. Dans cette imitation du mouvement des atomes, le cerveau humain s'avère nettement plus efficace que les meilleurs algorithmes.*

ALGORITHME OPTIMAL

« *Face à un liquide qui ne tient pas en place,* estime Bertrand Georgeot, du laboratoire de physique théorique, à l'université Paul-Sabatier de Toulouse, *notre cerveau n'a pas un algorithme ad hoc. Il met probablement en œuvre une méthode bien plus générale, heuristique, dont nous ne savons pas grand-chose.* » Du coup, les chercheurs ont écrit un nouvel algorithme qui calcule une solution encore plus optimale, en partant des meilleures solutions proposées par le public. Ce n'est pas la première fois que la science fait appel au public par l'intermédiaire de jeux. Avec *Foldit*, il s'agit de replier des protéines, dans *Galaxy Zoo*, de classifier des galaxies (lire ci-contre). L'avenir de la science participative passe-t-il par la «gamification» ou « ludification»? « *C'est une drôle de façon de faire de la science,* philosophe Pablo Arrighi, du laboratoire d'informatique fondamentale de Marseille, *mais si ça marche…* »

Pierre Vandeginste

(1) J. J. W. H. Sorensen *et al.*, *Nature*, *532*, 210, 2016.

(2) www.scienceathome.org/games/quantum-moves/game

LES CITOYENS AU SERVICE DE LA SCIENCE

Les chercheurs représentent une faible proportion de la population. Si même une petite partie des citoyens pouvait mettre leur force de travail au service de la science, le gain pourrait être énorme. De cette constatation sont nés les projets de science participative, initiés par les botanistes au XIXe siècle. Outre les jeux tel *Quantum Moves*, il existe de nombreuses initiatives : par exemple, la plate-forme participative Zooniverse, qui recense 48 projets dans toutes les disciplines des sciences (1), ou le projet *Galaxy zoo*, qui met à la disposition du public une base de données de plusieurs millions d'images de galaxies. Chacun peut aider à classer ces galaxies selon des critères précis. Après moins de dix ans d'existence, ces travaux ont permis la publication de près de 50 articles scientifiques sur la morphologie des galaxies. Mais la science participative ne se cantonne pas à la physique, à l'astronomie ou aux sciences de l'environnement : on trouve également des projets en histoire et en littérature. Une façon de faire de la science amplifiée par Internet et les réseaux sociaux.

(1) www.zooniverse.org

JACOB SHERSON /AARHUS UNIVERSITY

Un cœur de porc dans un babouin

Une équipe qui a greffé un cœur de porc chez un babouin est parvenue à maintenir le greffon pendant deux ans et demi. Un record dans la recherche des greffes entre espèces.

Une nouvelle avancée vient d'être obtenue dans la recherche sur les xénogreffes, ces transplantations d'organes dont le donneur est d'une espèce différente de celle du receveur. Une équipe menée par le biologiste Muhammad Mohiuddin de l'Institut américain du cœur, du sang et des poumons (NHLBI), à Bethseda, dans le Maryland, a réalisé des greffes de cœur de porc chez cinq babouins, avec une durée record de survie pour l'un des greffons de deux ans et demi (1). *«C'est un résultat extraordinaire car on n'a jamais réussi à maintenir un organe si longtemps en xénotransplantation,* commente Gilles Blancho, directeur de l'Institut de transplantation urologie-néphrologie au CHU de Nantes. *Depuis une dizaine d'années, peu de progrès en termes de survie de greffons ont été rapportés, sauf par cette équipe.»* En 2014, elle avait obtenu un précédent record d'un peu plus d'un an de survie (2).

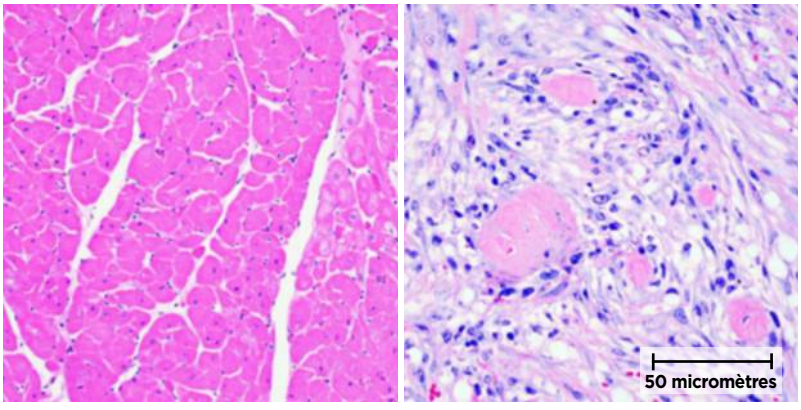
STRATÉGIE CHIRURGICALE

La xénotransplantation est envisagée pour répondre à l'actuelle pénurie d'organes. Les recherches s'orientent vers la greffe d'organes de porc en raison de la compatibilité physiologique avec l'homme. Mais cette stratégie chirurgicale représente un défi en raison de la forte réaction du système immunitaire des receveurs qui conduit au rejet du greffon.

Pour contourner cet obstacle, les biologistes ont recours à des organes de porcs génétiquement modifiés pour ne pas exprimer l'antigène (*) α-1,3-galactose, fortement reconnu par le système immunitaire de l'homme et des grands singes. Deux modifications ont été ajoutées pour cette nouvelle étude, avec l'insertion dans le génome porcin de deux gènes humains dont l'expression permet de diminuer encore la réponse immunitaire du receveur. Les chercheurs ont ensuite transplanté ces cœurs dans le corps des babouins qu'ils ont traités à l'aide d'un nouveau traitement immunosuppresseur. Celui-ci s'est montré particulièrement efficace durant toute sa durée. *«Nous aurions peut-être même pu obtenir une survie encore plus longue si nous n'avions pas stoppé ce traitement»*, note Muhammad Mohiuddin.

Cette avancée permet-elle d'envisager une xénotransplantation chez l'homme d'ici les prochaines années ? *«Non,* répond Gilles Blancho. *Car dans ces expériences, le greffon ne remplace pas le cœur du primate. Il est implanté dans le ventre et "branché" sur les vaisseaux abdominaux. Cet organe additionnel n'assure donc pas la circulation sanguine, qui continue d'être prise en charge par le cœur du primate. On n'est donc pas en mesure de savoir si cet organe pourrait véritablement assurer la fonction de pompe cardiaque pendant plus de deux ans. Toutefois, l'équipe a montré que ces cœurs greffés avaient un vrai battement et pas simplement une activité électrique, comme celle qui peut être enregistrée avec d'autres modèles de xénotransplantation.»* De prochaines réussites sont sans doute à venir.

Oriane Dioux



▲ *L'analyse au microscope des tissus des greffons implantés dans des babouins révèle les signes de bonne santé du greffon (à gauche) ou, au contraire, un rejet caractérisé par la formation de petits caillots dans les vaisseaux, une thrombose veineuse (à droite).*

MUHAMMAD M MOHIUDDIN

(1) M. Mohiuddin *et al., Nature Communications*, doi:10.1038/ncomms 11138, 2016.

(2) M. Mohiuddin *et al., J. Thorac. Cardiovasc. Surg., 148,* 1106,

(*) **Un antigène** est une substance, souvent étrangère à l'organisme, qui peut déclencher une réaction immunitaire en provoquant la production d'anticorps.

Où les électrons se rassemblent-ils ?

Qu'il s'agisse d'un bout de céramique en lévitation sur un nuage d'azote liquide ou d'un train filant à vive allure en Chine, la supraconductivité a de quoi fasciner plus d'un humain. Or les mathématiciens sont humains, et ils ont toujours cette envie d'expliquer, de comprendre… Premier réflexe : se tourner vers les physiciens qui construisent depuis des années des modèles pour décrire le phénomène.

LA PHYSIQUE NOUS APPREND que pour une certaine valeur du champ magnétique ambiant, ou de la température, certains objets deviennent supraconducteurs : le courant – donc les électrons – y circule sans résistance et le champ magnétique est expulsé vers l'extérieur. Sur le plan physique, cet effet baptisé Meissner explique la lévitation. Mais peut-on comprendre plus précisément le phénomène au niveau microscopique ? Et peut-on trouver la valeur critique du champ à laquelle apparaît la supraconductivité ? Oui, à condition de prendre son courage à deux mains, et son stylo… pour écrire l'équation de Ginzburg-Landau (tous deux prix Nobel de physique respectivement en 2003 et 1962) qui donne l'énergie associée au phénomène.

INUTILE D'AVOIR PEUR, nous ne l'écrirons pas dans cette chronique ; nous nous contenterons de mentionner qu'on y trouve le champ magnétique, une fonction inconnue appelée « paramètre d'ordre », des opérateurs vectoriels qui répondent aux doux noms de rotationnel, de gradient… et une intégrale sur l'ensemble du solide supraconduteur. Autrement dit, un mélange de paramètres physiques et d'informations sur la géométrie de ce solide. Pour déterminer son état, il suffit de trouver les paramètres qui minimisent l'énergie. Dans cette quête d'extremum, un bon lycéen en voie scientifique pense à chercher les zéros de la dérivée ; le mathématicien, qui a conscience que les arguments ici sont des fonctions, utilise l'équation d'Euler-Lagrange vérifiée par le minimiseur. Cette fois encore, toute peur est inutile : nous ne l'écrirons pas ; sachons seulement que le mathématicien, même aguerri, trouve encore cette description trop compliquée pour la manipuler et procède à une simplification baptisée linéarisation. Il est ainsi ramené à une situation où il pourra utiliser les outils plus maniables issus de l'algèbre linéaire. Il convient bien entendu d'être soigneux et prudent avec cette approximation : il faut quantifier l'erreur commise afin de s'assurer que les résultats démontrés dans le cadre simplifié seront proches de la solution dans le modèle de départ.

LA DERNIÈRE ÉTAPE requiert de prendre en compte la géométrie du solide. Pour cela, on va le découper en morceaux : par exemple, pour un polygone dans un plan, on distingue l'intérieur, le bord et les sommets ou « coins ». On résout le problème sur chaque morceau puis on recolle (toujours en contrôlant la qualité de l'approximation). Qu'observe-t-on ? Les solutions ne sont pas les mêmes sur chacun des domaines, le champ critique au coin est plus important que le champ critique au bord, qui est à son tour plus grand qu'à l'intérieur. Ainsi, lorsque la valeur du champ diminue, le phénomène de supraconductivité apparaît d'abord dans les coins (du plus aigu au plus obtus), puis aux bords avant de s'étendre à l'ensemble du solide. Autrement dit, les électrons responsables de la supraconductivité commencent par s'émanciper dans les coins : c'est l'effet de pointe qui est démontré. Obtenir les mêmes résultats pour un solide quelconque à trois dimensions reste un objectif de recherche ! ■

> **« LES ÉLECTRONS RESPONSABLES DE LA SUPRACONDUCTIVITÉ COMMENCENT PAR S'ÉMANCIPER DANS LES COINS : C'EST L'EFFET DE POINTE »**

Roger Mansuy, professeur au lycée Louis-le-Grand, à Paris, nous raconte, chaque mois, un thème mathématique inspiré par un exposé grand public.

Retrouvez la conférence de Virginie Bonnaillie-Noël sur ce thème : http://tinyurl.com/youtube-supraconductivite

DR

ABONNEZ-VOUS À La Recherche

Et recevez EN CADEAU ces 2 numéros

Alcool, tabac, cannabis, jeux d'argent, internet… Ce numéro des Dossiers de La Recherche explique comment naissent les addictions et fait le point sur les avancées qui permettent d'envisager de nouvelles méthodes de soin, avec ou sans médicament.

+

Les dossiers de
La Recherche
Les origines de la vie
> La quête des premiers organismes
> La découverte des plus anciens fossiles
> La création de bactéries artificielles
Les nanomédicaments

A quoi ressemblaient nos premiers ancêtres ? Comment ont-ils émergé et se sont-ils développés sur la Terre primitive ? C'est en conjuguant des recherches que les scientifiques convergent vers une meilleure compréhension des origines de la vie.

10 nos + 1 n° double | **60€ seulement** au lieu de ~~71,90€~~

ou 5€ par mois

BULLETIN D'ABONNEMENT

À retourner sous enveloppe affranchie à La Recherche - Service Abonnements - 4, rue de Mouchy - 60438 Noailles cedex

OUI, je m'abonne à **La Recherche** et je reçois **EN CADEAU** les 2 numéros : Addictions (E80) + Les origines de la vie (D53).

☐ **1 AN - 10 nos + 1 n° double + 4 hors-série La Recherche** pour **84 €** au lieu de ~~99,50 €~~ ou **7 €/mois**(*).

Je préfère l'abonnement au mensuel seul :

☐ **1 AN - 10 nos + 1 n° double** pour **60 €** au lieu de ~~71,90 €~~ ou **5 €/mois**(*).

MES COORDONNÉES

Nom :

Prénom :

Adresse :

Code postal : Ville :

Téléphone portable :

Pour recevoir plus rapidement les informations relatives à votre abonnement, merci d'indiquer votre e-mail :

MON MODE DE RÉGLEMENT

☐ Je règle en une seule fois :

☐ **84 €** au lieu de ~~99,50 €~~ ☐ **60 €** au lieu de ~~71,90 €~~.

Je règle par :

☐ Chèque bancaire à l'ordre de La Recherche ☐ Carte bancaire

N°

Expire fin

Je note les 3 derniers chiffres du numéro inscrit dans la zone signature, au dos de ma carte

Signature obligatoire

☐ Je règle par prélèvement : ☐ **7 €**/ mois(*) ☐ **5 €**/ mois(*).

Je remplis le mandat de prélèvement SEPA ci-contre.

MANDAT DE PRÉLÈVEMENT **SEPA**

PLRC512

En signant ce formulaire de mandat, vous autorisez La Recherche à envoyer des instructions à votre banque pour débiter votre compte. Vous autorisez également votre banque à débiter votre compte conformément aux instructions de La Recherche. Vous bénéficiez du droit d'être remboursé par votre banque selon les modalités décrites dans la convention que vous avez passée avec elle. Toute demande de remboursement doit être présentée dans les 8 semaines suivant la date de débit de votre compte. Vos droits concernant ce mandat sont expliqués dans une notice disponible auprès de votre banque. Il s'agit d'un prélèvement récurrent : le premier prélèvement sera effectué après l'enregistrement de votre abonnement.

Créancier
Sophia Publications - LA RECHERCHE
8, rue d'Aboukir - 75002 Paris

Identification du créancier
FR48ZZZ440981

Inscrivez VOS COORDONNÉES (merci d'écrire en majuscules)

Nom

Prénom

Adresse

Code Postal Ville

Indiquez LES COORDONNÉES DE VOTRE COMPTE (disponibles sur votre R.I.B.)

IBAN - Numéro d'identification international du compte bancaire

BIC - Code international d'identification de votre banque

N'oubliez pas de joindre un Relevé d'Identité Bancaire (R.I.B.).

À Le / /

Signature obligatoire

Sophia Publications - SA au capital de 9 115 568 € - 562 029 223 RCS Paris
Service abonnements : ✆ France : 01 55 56 71 15 - ✆ Etranger : 00 33 155 56 71 15
E-mail : abo.recherche@groupe-gli.com

La Recherche

(*) Pour un minimum de 12 prélèvements. Au terme des 12 mois votre abonnement se poursuivra au même tarif préférentiel, et pourra être interrompu à tout moment par simple courrier.
Je peux acquérir séparément les numéros normaux au prix de 6€40 et le numéro double au prix de 7€90. Offre réservée aux nouveaux abonnés résidant en France métropolitaine jusqu'au 31/12/2016 et dans la limite des stocks disponibles.
Loi informatique et libertés : vous disposez d'un droit d'accès, rectification et de suppression des informations vous concernant. Elles sont destinées exclusivement à SOPHIA PUBLICATIONS et à ses partenaires sauf opposition de votre part en cochant la case ci-après ☐.

1 La fabrique des souvenirs
P. 38

2 Le sommeil ouvre une fenêtre sur la pensée
P. 43

3 Entretien avec le neuropsychologue Philippe Peigneux
P. 48

SOMMEIL l'aide-mémoire

Bien dormir est essentiel pour se souvenir. Mais que se passe-t-il alors dans notre cerveau ? Aujourd'hui, les neuroscientifiques explorent avec une précision de plus en plus grande les mécanismes liés à la consolidation de la mémoire. En visualisant l'activité de quelques neurones chez la souris, ils ont même pu décoder ses « rêves » et récemment démontrer qu'elle rejoue les informations de la veille pour mieux les mémoriser !
Chez l'homme, l'observation des aires cérébrales activées pendant le sommeil indique que dormir favorise le stockage des informations à long terme. Un phénomène qui, pour les enfants, survient après une simple sieste !

▶ *L'électroencéphalographie, qui consiste à amplifier et enregistrer le signal électrique provenant des neurones, est la technique la plus courante pour étudier l'activité cérébrale pendant le sommeil.*

MUAMMER MUJDAT UZEL/GETTY IMAGES

1

La fabrique des souvenirs

En enregistrant l'activité cérébrale de souris endormies, les neuroscientifiques ont découvert les mécanismes neuronaux par lesquels le sommeil consolide la mémoire. Une finesse d'analyse inégalée.

Karim Benchenane, neuroscientifique

Repères

- **C'est dans une petite structure cérébrale appelée « hippocampe » que se forment nos souvenirs.**
- **Pendant le sommeil, les neurones de l'hippocampe se réactivent : ils rejouent l'information de l'éveil selon la même séquence.**
- **En privant des rongeurs de ces réactivations puis en leur associant de faux souvenirs pendant le sommeil, les chercheurs ont prouvé que les réactivations consolident la mémoire.**

La mémoire vient en dormant. Qui ne l'a pas vérifié en réussissant un matin à réciter un poème alors que la veille, l'exercice semblait si ardu ? Si l'effet bénéfique du sommeil dans la mémoire n'est un secret pour personne, on ne peut pas en dire autant des mécanismes sous-jacents. Comment le sommeil et la mémoire sont-ils liés ? Aujourd'hui, des technologies de pointe nous permettent d'explorer cette question chez l'animal avec une précision jamais égalée. C'est ainsi que l'on a pu récemment démontrer l'implication de certains processus neuronaux dans la consolidation des souvenirs pendant le sommeil chez le rongeur. Avec mon équipe de l'École supérieure de physique et de chimie industrielles (ESPCI), à Paris, nous nous sommes focalisés sur l'étude de l'hippocampe, petite structure cérébrale située sous le cortex, identifiée comme la zone où se forment les nouveaux souvenirs. Nous avons ainsi enregistré les activations d'une famille de neurones particuliers de l'hippocampe : les « cellules de lieu ». Découverts par John O'Keffe en 1978, ces neurones s'activent – on dit qu'ils déchargent – d'une manière différente selon le lieu qu'occupe la souris dans son environnement (1). Cette découverte a valu à son auteur le prix Nobel de médecine en 2014.

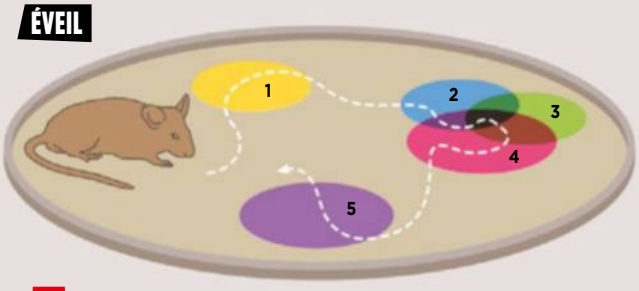
Comme souvent en science, la réalité s'avère un peu plus compliquée. En effet, si chaque neurone codait pour un seul lieu, il en faudrait un nombre extrêmement important pour couvrir tous les environnements que l'on connaît, et ce codage serait assez inefficace. En fait, un même neurone peut être actif dans différents contextes. Par exemple, un neurone A peut être actif quand l'animal est situé en haut à droite d'une boîte carrée, mais il peut aussi s'activer lorsque l'animal se trouve en bas d'une boîte ronde. On s'aperçoit cependant que lorsque le neurone A décharge dans l'environnement carré, un autre neurone B décharge en même temps. De la même façon, lorsque l'animal est en bas à gauche dans la boîte ronde, le neurone A décharge cette fois en même temps qu'un autre neurone C. Le codage d'un lieu est donc réalisé par un ensemble – ou une assemblée – de plusieurs neurones et non par un neurone unique. Ainsi, quand l'assemblée cellulaire AB est active, l'animal est en haut à droite dans la boîte carrée alors que l'activation de l'assemblée AC indique que l'animal se trouve en bas à gauche dans la boîte ronde. Ce codage combinatoire est si précis que l'on peut prédire avec certitude la position d'un animal dans son environnement, simplement en regardant l'activité électrique de quelques dizaines de neurones.

Ce codage s'est révélé très important pour étudier le rôle du sommeil dans la mémoire spatiale du rongeur. En effet, on peut visualiser à quel lieu « pense » l'animal alors qu'il est endormi. C'est ce

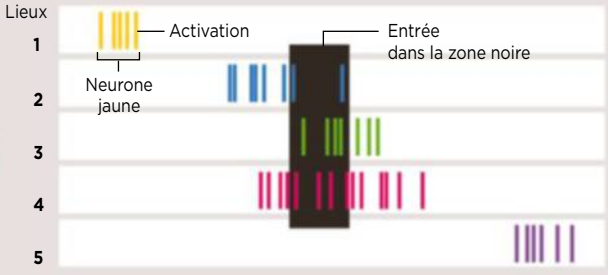
qu'ont fait pour la première fois les neuroscientifiques américains Matt Wilson et Bruce McNaughton, en 1994. Grâce à des électrodes capables d'enregistrer l'activité électrique de plusieurs neurones, ils ont comparé les décharges neuronales des cellules de lieu pendant l'éveil et pendant le sommeil suivant. Ils ont ainsi montré que lorsque l'animal occupe un lieu particulier pendant l'éveil, toutes les cellules de lieu correspondant à cet endroit précis déchargent toujours ensemble alors que les autres restent silencieuses. Leur activité est corrélée. Qu'en est-il pendant le sommeil ? Et bien, les cellules de lieu qui ont déchargé ensemble pendant l'éveil alors que l'animal explorait son environnement déchargent toujours ensemble pendant le sommeil (2). Or, ce phénomène dit de « réactivation neuronale » n'a lieu que pendant le sommeil suivant l'exploration. Il est absent dans le sommeil précédent. En outre, il se manifeste pour de nombreux neurones, excluant la possibilité que cette corrélation soit due à la chance. Cette observation appuie l'une des grandes théories du sommeil, proposée en 1989 par Gyorgy Buzsaki, de l'université de New York. D'après cette théorie, les informations encodées par l'hippocampe pendant l'éveil sont rejouées pendant le sommeil : les neurones impliqués •••

Fig. 1 L'exploration de la veille rejouée pendant le sommeil

ÉVEIL



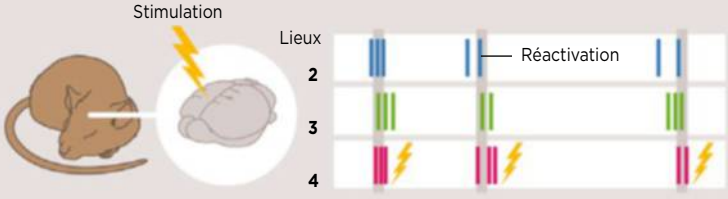
1 Une souris est placée dans une arène. Elle est équipée d'un implant qui mesure l'activité électrique de l'hippocampe, zone du cerveau spécialisée dans la mémoire, et enregistre précisément les groupes de neurones activés lors de ses déplacements.



2 Lorsque la souris se rend dans le lieu 1, le neurone jaune s'active. Lorsqu'elle atteint la zone noire, intersection des lieux 2, 3 et 4, les neurones bleu, vert et rouge s'activent ensemble. Cette combinaison définit une position précise de l'animal.

SOMMEIL À ONDES LENTES

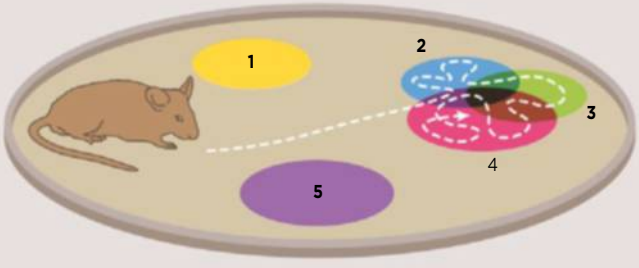
3 Les trois neurones – bleu, vert et rouge – qui se sont activés ensemble pendant l'éveil se réactivent toujours ensemble pendant le sommeil, mais plus rapidement que pendant l'éveil. On parle de réactivations neuronales. La souris rejouerait ainsi les informations de l'éveil pour mieux les mémoriser.



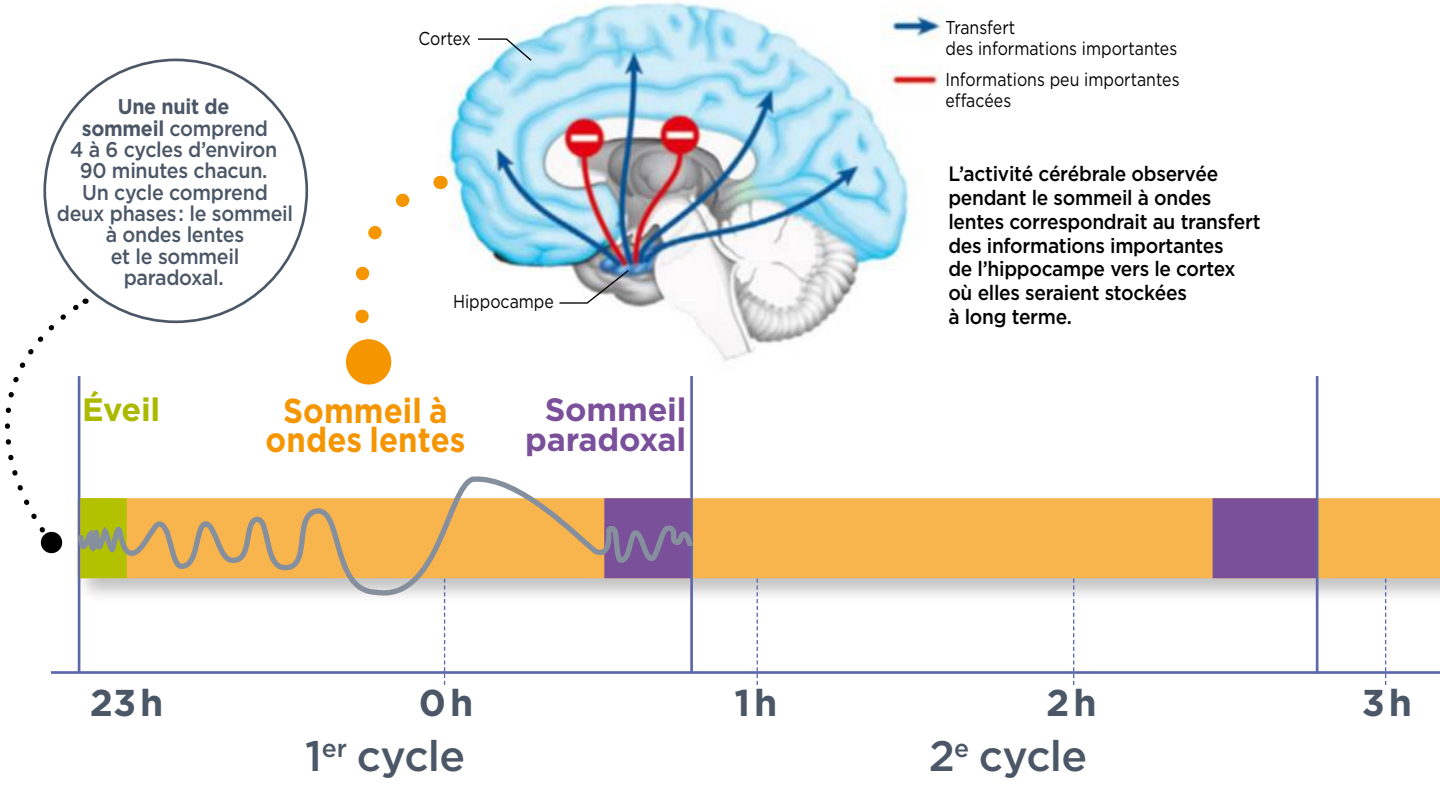
4 Pour le prouver, pendant le sommeil, on stimule électriquement la zone de récompense de la souris à chaque fois que le neurone rouge est réactivé. La récompense s'applique aussi aux neurones bleu et vert qui se réactivent toujours en même temps que le neurone rouge.

RÉVEIL

5 Au réveil, la souris se rend dans les zones 2, 3 et 4, pensant y trouver une récompense. On lui a donc créé un faux souvenir pendant qu'elle dormait. Ce comportement prouve aussi que les réactivations des neurones bleu, vert et rouge pendant le sommeil et les activations de ces mêmes neurones pendant l'éveil encodent la même information spatiale. Quand elle dort, la souris rejoue donc ses trajectoires de la veille. C'est bien le fait de rejouer les informations de la veille pendant le sommeil qui permet une meilleure mémorisation.



INFOGRAPHIE : SYLVIE DESSERT


Une nuit de sommeil comprend 4 à 6 cycles d'environ 90 minutes chacun. Un cycle comprend deux phases : le sommeil à ondes lentes et le sommeil paradoxal.
Cortex
Hippocampe
Transfert des informations importantes
Informations peu importantes effacées
L'activité cérébrale observée pendant le sommeil à ondes lentes correspondrait au transfert des informations importantes de l'hippocampe vers le cortex où elles seraient stockées à long terme.
Éveil
Sommeil à ondes lentes
Sommeil paradoxal
23 h
0 h
1 h
2 h
3 h
1er cycle
2e cycle

••• dans un apprentissage ou dans la formation de souvenirs se réactiveraient spontanément pendant le sommeil de façon à consolider les souvenirs, mais également à les transférer vers le cortex pour un stockage à long terme.

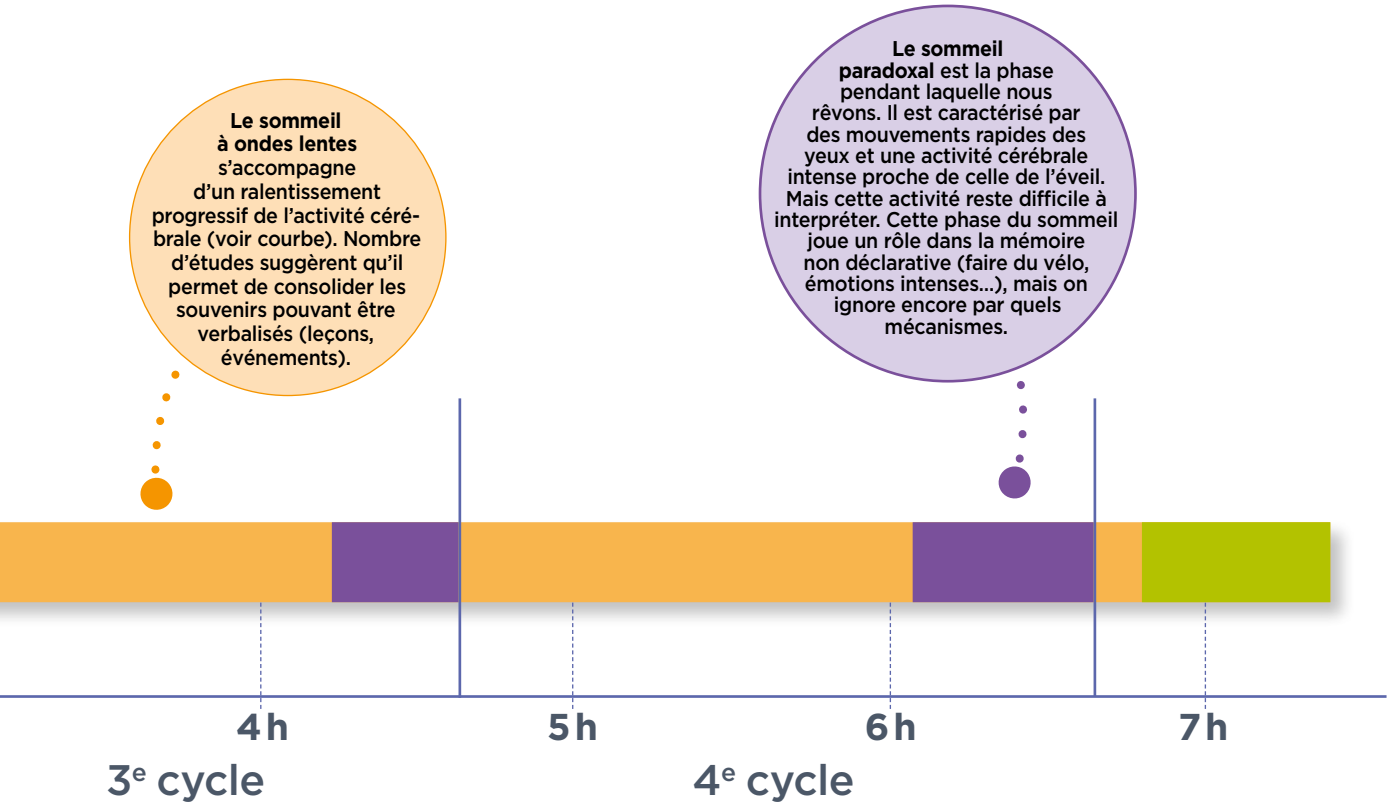
En enregistrant l'activité électrique globale de l'hippocampe pendant le sommeil, les chercheurs ont remarqué que les assemblées de neurones correspondant à des lieux précis sont réactivées à des instants particuliers du sommeil, pendant la phase de sommeil à ondes lentes. Principalement lorsque l'activité électrique de l'hippocampe prend la forme d'oscillations très courtes et très rapides. Baptisées *ripples,* ces oscillations durent entre 50 et 70 millisecondes et surviennent toutes les secondes en moyenne.

SOUVENIR ARTIFICIEL

Pour comprendre la signification de ces réactivations, l'équipe de Matt Wilson procède, quelques années plus tard, à une nouvelle expérience dans laquelle est enregistrée l'activité cérébrale d'un rat placé dans un couloir rectiligne, de façon à ce que l'animal suive toujours la même trajectoire. Comme dans l'étude de 1994, il constate que les assemblées de neurones qui déchargent ensemble pendant l'éveil déchargent aussi ensemble pendant le sommeil. Mais pas n'importe comment ! En effet, les neurones déchargent exactement dans le même ordre pendant l'éveil et pendant le sommeil qui suit. Tout se déroule comme si cette activité cérébrale du sommeil agissait comme la répétition d'une leçon dans un apprentissage classique.

Restait à le démontrer. De fait, ce n'est pas parce qu'on observe des réactivations neuronales qu'elles sont vraiment utiles à la mémorisation. Pour démontrer leur effet bénéfique dans la mémoire, nous avons donc eu l'idée de les supprimer pour vérifier si cette suppression perturbe la mémoire. Un problème s'est très vite imposé : pour supprimer les réactivations neuronales, il faut d'abord les observer, et il est alors trop tard pour les supprimer. Comment résoudre ce paradoxe ? Avec Gabrielle Girardeau et Michaël Zugaro au Collège de France, en collaboration avec Gyorgy Buzsaki, nous avons contourné le problème. Nous savions que les réactivations ont lieu pour la plupart pendant les *ripples* du sommeil à ondes lentes. Dès que l'on observe ces oscillations rapides pendant le som-

INFOGRAPHIES : SYLVIE DESSERT - MARYVONNE MARCONVILLE


Le sommeil à ondes lentes s'accompagne d'un ralentissement progressif de l'activité cérébrale (voir courbe). Nombre d'études suggèrent qu'il permet de consolider les souvenirs pouvant être verbalisés (leçons, événements).
Le sommeil paradoxal est la phase pendant laquelle nous rêvons. Il est caractérisé par des mouvements rapides des yeux et une activité cérébrale intense proche de celle de l'éveil. Mais cette activité reste difficile à interpréter. Cette phase du sommeil joue un rôle dans la mémoire non déclarative (faire du vélo, émotions intenses…), mais on ignore encore par quels mécanismes.
4h
5h
6h
7h
3e cycle
4e cycle

meil à ondes lentes, on sait que des réactivations neuronales vont avoir lieu. Nous avons donc détecté ces *ripples*. Puis nous les avons supprimés à l'aide d'une technique de stimulation électrique, empêchant ainsi toutes les réactivations. Dans notre expérience, les rats devaient résoudre une tâche de mémoire spatiale dans un labyrinthe en forme d'étoile. L'exercice consistait à se souvenir de l'endroit où se trouvait la nourriture que nous avions disposée dans seulement trois des huit bras du labyrinthe. Puis pendant l'heure de sommeil qui suivait l'apprentissage, on déclenchait des stimulations au moment des *ripples* pour les supprimer. Résultat : au réveil, la performance des rats pour retrouver la nourriture a diminué de façon significative. Après le sommeil, ils ne se souvenaient pas de ce qu'ils avaient appris la veille, preuve que les réactivations neuronales participent activement à l'apprentissage (3).

Preuve ? Pas tout à fait. Car si cette expérience démontrait l'implication des *ripples* dans la consolidation de la mémoire, le lien avec les réactivations n'était qu'indirect. Et pour cause, l'activité électrique enregistrée dans l'hippocampe au moment des *ripples* est variée et ne correspond pas exclusivement à des réactivations neuronales. Il pourrait donc tout à fait y avoir d'autres phénomènes en jeu. Avec mes étudiants Gaetan de Lavilléon et Marie Lacroix, de l'ESPCI, nous avons donc décidé de nous attaquer à ce problème en le prenant par l'autre bout. Au lieu de perturber la mémoire en supprimant les réactivations neuronales pendant le sommeil, nous avons tenté d'utiliser ces réactivations pour créer un souvenir artificiel (4). Comment ? Nous avons utilisé une technologie qui permet d'associer à chaque décharge neuronale une stimulation électrique qui active ce que l'on appelle le circuit de la récompense dans le cerveau de la souris. Et ce automatiquement. Plus précisément, nous avons stimulé le faisceau médian prosencéphalique, une région du cerveau qui, une fois stimulée, induit une forte récompense chez les rongeurs et qui, par conséquent, est •••

Tout se déroule comme si cette activité cérébrale du sommeil agissait comme la répétition d'une leçon dans un apprentissage classique

▲ *Les bases neuronales du lien entre sommeil et mémoire ont surtout été identifiées chez la souris. Mais il est très probable que les mêmes mécanismes se produisent chez l'homme.*

••• fréquemment exploitée pour leur faire exécuter des tâches comportementales.
Ainsi, chaque fois qu'une cellule de lieu se réactivait pendant le sommeil, une stimulation de récompense était envoyée. Cette association permettait de créer artificiellement, pendant le sommeil, une préférence de l'animal pour le lieu correspondant. Et au réveil, les souris se dirigeaient effectivement vers le lieu encodé par ce neurone (Fig. 1). L'effet sur le comportement de l'animal était significatif : il passait davantage de temps dans le lieu associé au faux souvenir. Et il mettait moins de temps pour s'y rendre au réveil. Tout se passait comme si l'animal pensait y retrouver une récompense. Sauf qu'il n'y avait rien de particulier à cet endroit. L'effet n'était donc visible que dans les premiers essais après le réveil avant de s'atténuer lorsque l'animal avait compris qu'il n'y avait aucune récompense. Cette expérience nous a permis de démontrer que les cellules de lieu détiennent bien la même information spatiale pendant l'exploration de l'environnement et pendant le sommeil. Cela démontrait également que les réactivations des cellules de lieu pendant le sommeil correspondent bien aux trajectoires réalisées par l'animal dans l'espace réel pendant l'éveil. C'est donc la réactivation des expériences vécues qui est la véritable cause de la consolidation de la mémoire pendant le sommeil.

PERSPECTIVES THÉRAPEUTIQUES

Enfin, cette expérience nous a permis de montrer qu'il est possible de créer des souvenirs explicites, concrets, durant le sommeil. Des études précédentes avaient mis en évidence que l'on peut créer des conditionnements simples tels qu'associer une odeur à une récompense. Mais dans toutes ces études, l'apprentissage impliquait l'apparition d'une réaction réflexe à un stimulus sensoriel. Dans notre cas, aucun stimulus n'était présenté au réveil de l'animal qui se déplaçait librement et « choisissait » sa destination. L'ensemble de ces observations indiquent qu'il est possible de changer la teneur émotionnelle d'un souvenir pendant le sommeil : le rendre plus positif ou potentiellement plus négatif. Une des applications possibles de notre étude est le développement de nouvelles thérapies pour soigner le stress post-traumatique (lire ci-contre.)
L'ensemble des résultats et des théories présentées dans cet article n'a pas encore été démontré chez l'homme. Mais il y a fort à parier que les mécanismes cellulaires de la consolidation de la mémoire sont analogues. Pour le montrer, cela nécessiterait d'utiliser des implants neuronaux invasifs, ce qui pose de sérieux problèmes éthiques. Toutefois, des équipes de neuroscientifiques travaillent avec des patients épileptiques déjà implantés (leur vie en dépendant) pour essayer de mieux comprendre les mécanismes neuronaux de la mémoire. Mais ces patients sont souvent affaiblis et ces recherches sont rares. Reste qu'en approfondissant nos connaissances sur les mécanismes fins mis en jeu pendant le sommeil, nous espérons pouvoir maximiser concrètement les effets bénéfiques du sommeil dans la mémoire : améliorer les performances des sportifs, limiter les méfaits des maladies neurodégénératives sont autant de perspectives visées par les chercheurs. ■

(1) J. O'Keefe & L. Nadel, *The Hippocampus as a Cognitive Map*. Clarendon Press, Oxford, 1978.
(2) M.A. Wilson & B.L. McNaughton, *Science, 265,* 676, 1994.
(3) G. Girardeau *et al., Nature Neuroscience, 12,* 1222, 2009.
(4) G. de Lavilléon *et al., Nature Neuroscience, 18,* 493, 2015.

SOIGNER LE STRESS POST-TRAUMATIQUE

Une des thérapies mises en œuvre pour soigner le stress post-traumatique consiste à replacer les patients dans la situation traumatisante qu'ils ont vécue mais en y associant un contexte plus apaisant pour casser la réaction pathologique de peur. Toutefois, ces thérapies manquent relativement d'efficacité. Pourquoi ? On peut supposer que lorsque les patients sont amenés à repenser à leur traumatisme dans le but d'en atténuer la charge émotionnelle, ils savent que ce n'est pas réel, et surtout, le cerveau n'est pas trompé. Si l'on pouvait identifier, pendant le sommeil, les réactivations neuronales associées aux souvenirs traumatisants, il est fort probable que ce serait le moment optimum pour supprimer l'association pathologique entre l'expérience traumatisante et la peur qu'elle engendre. Or, chez la souris, on est capable de créer des souvenirs artificiels positifs pendant le sommeil en associant une récompense au souvenir d'un lieu donné. En l'état, cela serait-il envisageable chez des patients souffrant de stress post-traumatique ? Non, car leur traumatisme serait associé à un événement positif, ce qui n'est pas souhaitable. Pour cette raison, nous sommes en train d'étudier si une stimulation de plaisir pendant le sommeil peut supprimer une association négative préexistante. Une autre solution serait de trouver un moyen technique pour réduire la sensation de peur au moment où les patients rêvent de l'événement traumatisant. En effet, une modification de la charge émotionnelle d'un souvenir traumatisant est plus à même de réussir pendant le sommeil que pendant l'éveil car le cerveau du patient le considère alors comme réel.

DE LAVILLEON - LACROIX

2

Le sommeil ouvre une fenêtre sur la pensée

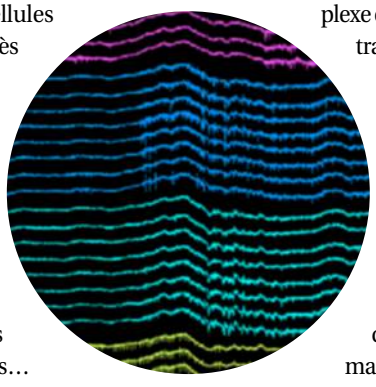
Notre cerveau garde en mémoire des modèles du monde qui nous permettent d'agir sur notre environnement. Pour comprendre comment ces modèles fonctionnent, les chercheurs étudient l'activité cérébrale de souris pendant qu'elles dorment.

Adrien Peyrache, neuroscientifique

Tuxedo Park, non loin de New York, 1937. Dans le laboratoire qu'il s'est fait construire au sous-sol de son manoir, Alfred Loomis, richissime homme d'affaires américain, surdoué et passionné de science, enregistre l'activité cérébrale de ses invités endormis. Il démontre ainsi pour la première fois que le cerveau ne s'arrête pas pendant le sommeil. S'ensuivront cinquante ans d'étude du sommeil, de sa physiologie et de son rôle dans la mémoire et les émotions.

Au tournant des années 1990, une nouvelle étape est franchie : Matthew Wilson et Bruce McNaughton, de l'université d'Arizona, et Gyorgy Buzsaki, de l'université Rutgers, aux États-Unis, montrent que les neurones de l'hippocampe (*) appelés « cellules de lieu » s'activent les uns après les autres lorsqu'un animal explore son environnement, et que l'ensemble de ces activations représente l'intégralité de la trajectoire qu'il a vécue pendant l'éveil. Plus étonnant encore : pendant le sommeil qui suit cette exploration, les cellules de lieu sont réactivées… dans le même ordre ! Autrement dit, l'animal rejoue pendant le sommeil les trajectoires de l'éveil (1). Pour les chercheurs, cette réactivation nocturne a un rôle : consolider les souvenirs créés pendant le jour. Ils soulignent ainsi le rôle primordial de l'hippocampe dans cette consolidation. Depuis, les réactivations neuronales pendant le sommeil ont été observées en même temps dans l'hippocampe et dans toutes les régions du cerveau.

Toutefois, ces réactivations spontanées des nouveaux souvenirs dans l'hippocampe ne représentent qu'une infime partie de l'activité cérébrale observée pendant le sommeil. Si l'on est capable d'associer les réactivations des cellules de lieu à des trajectoires précises, on ne peut pas en dire autant de la majorité de l'activité cérébrale du sommeil, impossible à « décoder » tant l'information qu'elle contient est complexe et riche. Pourtant, cela permettrait de comprendre non seulement la base neuronale des nouveaux souvenirs, mais également la structure de toutes les mémoires déjà ancrées dans le cerveau. Pas uniquement celles qui concernent nos souvenirs d'événements passés, auxquels on pense spontanément, mais une autre forme particulière de la mémoire : les modèles internes du monde que nous formons depuis notre naissance. •••



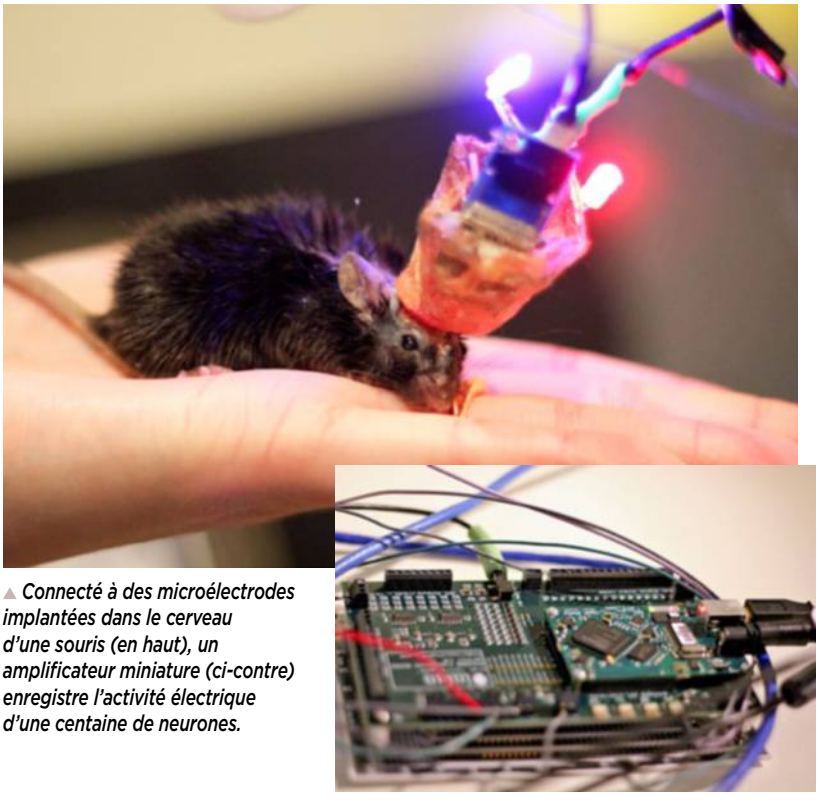
▲ *Grâce à ces signaux cérébraux, les neuroscientifiques décodent l'activité neuronale de souris.*

ADRIEN PEYRACHE

Repères

- **Dans le cortex, nous possédons des modèles internes de notre corps et du monde.**
- **Un exemple simple est la « boussole neuronale », une assemblée de neurones qui représente avec précision la position de la tête.**
- **Pendant le sommeil, ces neurones rejouent spontanément l'activité cérébrale de l'éveil. Ces réactivations pourraient servir à la mémorisation de ces modèles internes.**

(*) **L'hippocampe** est une structure cérébrale allongée qui se situe sous la surface du cortex, dans chaque hémisphère.



▲ *Connecté à des microélectrodes implantées dans le cerveau d'une souris (en haut), un amplificateur miniature (ci-contre) enregistre l'activité électrique d'une centaine de neurones.*

••• Qu'est-ce qu'un modèle interne ? Prenons un exemple. Lorsqu'une pomme tombe de sa branche, nous sommes capables d'anticiper sa trajectoire ; intuitivement, on sait comment elle chutera car, quelque part dans notre cerveau, nous avons en mémoire un modèle interne de la gravité sans que quelqu'un nous ait jamais appris qu'une pomme tombe toujours vers le bas. Dès lors, comment étudier ces modèles ? Une idée est de regarder des systèmes moins complexes que l'hippocampe. Des systèmes dans lesquels l'information est plus simple et reste stable dans les différentes situations auxquelles un animal peut être confronté.

Un exemple d'un tel système est la région visuelle primaire, située dans le cortex. Dans les années 1960, David Hubel et Tortsen Wiesel, de l'université Harvard, ont démontré que les aires cérébrales qui reçoivent les informations visuelles sont organisées anatomiquement comme une carte de la rétine. En d'autres termes, l'agencement spatial du monde visuel se retrouve directement sur le cortex. Mais il ne représente que des attributs simples de la vue : les contours des objets, des segments de lignes continues dans différentes orientations. Ces chercheurs reçoivent le prix Nobel de médecine en 1981 pour cette découverte.

Au début des années 2000, Amos Arieli et son équipe de l'Institut Weizmann, en Israël, ont eu l'idée de suivre l'activation des neurones de ces aires visuelles primaires chez des chats alors qu'ils étaient plongés dans le noir. Ils ont ainsi pu observer directement l'image du monde extérieur perçue par l'animal simplement en visualisant l'activité corticale. La surprise fut grande. De fait, bien que l'animal ne voie plus rien, ses aires visuelles primaires sont spontanément actives. Les décharges neuronales – les impulsions électriques émises par un neurone lorsqu'il est excité – sont en outre semblables à celles de l'éveil. Les neurones ne s'activent pas de façon désordonnée. Comment interpréter cette observation ? En l'absence de stimulation de la rétine, les neurones de la vision reconstituent un monde identique à celui dans lequel le chat a grandi.

À l'université de New York, notre laboratoire, dirigé par Gyorgy Buzsaki, a travaillé sur un modèle interne encore plus élémentaire : celui de la « boussole neuronale » (2). Il s'agit d'un ensemble de neurones – on parle d'assemblée – situé dans le cortex, qui fournit au cerveau des informations sur la direction de la tête (et devrait d'ailleurs être considéré comme un véritable sixième sens). Cette assemblée de neurones est activée par le système vestibulaire de l'oreille interne, un remarquable gyroscope. On peut diviser cette assemblée en sous-groupes. Les neurones de chaque sous-groupe déchargent ensemble pour une direction précise. On peut les considérer comme l'aiguille de la boussole qui indique l'orientation de la tête. Mis en évidence chez la souris, ce phénomène existe sans doute aussi chez l'homme. Ainsi, lorsqu'on tourne la tête vers la gauche, un petit groupe de neurones s'active tandis que les autres restent silencieux. Au contraire, si l'on tourne la tête vers la droite, le premier groupe devient silencieux, tandis qu'un autre groupe s'active.

RÊVE DE PROMENADE

Pour visualiser cette activité neuronale, nous avons placé un implant dans le cortex de souris. Cet implant est composé de microélectrodes qui enregistrent l'activité électrique des neurones environnants. L'espace entre chaque site d'enregistrement est de l'ordre de la taille d'un neurone,

ADRIEN PEYRACHE

de sorte que par un procédé analogue à l'écholocation utilisée dans les sonars, il est possible de repérer quel neurone est excité. Avec des implants dotés de 64 sites d'enregistrement, nous avons pu distinguer jusqu'à 100 neurones individuels.

Nous avons alors observé que, lorsqu'une souris est endormie, les neurones de la boussole neuronale déchargent d'une manière similaire à ce que l'on observe pendant l'éveil. L'activité neuronale se propage dans l'assemblée d'une direction à l'autre, de façon continue, comme si l'animal tournait la tête en se promenant dans un environnement (Fig. 1). Nous avons également démontré que la propagation de l'activité électrique au sein des assemblées de neurones gardant en mémoire la direction de la tête est modulée par les différentes phases du sommeil. Pendant le sommeil paradoxal (la phase du sommeil pendant laquelle on rêve, lire p. 40), la vitesse de rotation de l'aiguille de la boussole neuronale est comparable à celle de l'éveil tandis que, pendant le sommeil à ondes lentes (*), elle peut tourner jusqu'à dix fois plus vite. Autrement dit, la séquence d'activité des neurones au sein de l'assemblée est dix fois plus rapide. Les causes d'une telle compression temporelle pendant le sommeil à ondes lentes restent obscures. Mais elles interviennent sans doute dans les mécanismes de consolidation de la mémoire. De fait, on observe une accélération similaire dans les cellules de lieu situées dans l'hippocampe pendant cette même phase. Il est donc fort probable que les réactivations des cellules de lieu dans l'hippocampe et des cellules de la direction de la tête, dans le cortex, aient une influence mutuelle dans la consolidation de la mémoire. Reste à en préciser le mécanisme.

L'étude du sommeil paradoxal nous a permis, quant à lui, de préciser les propriétés de la boussole neuronale. Cette phase de sommeil peut en effet nous aider à comprendre quelque chose de fondamental sur la dynamique du cerveau, car son état physiologique est apparemment similaire •••

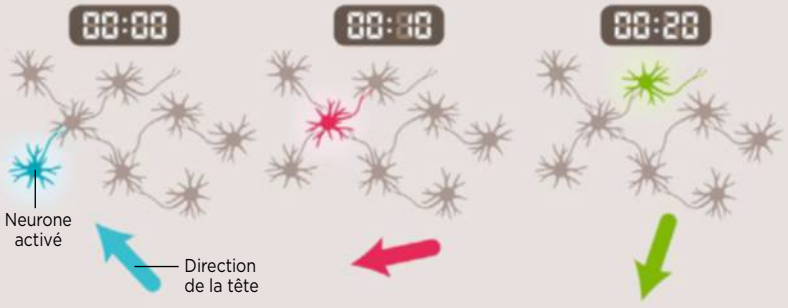
(*) Dans le sommeil à ondes lentes, qui occupe 80 % du temps de sommeil, l'activité cérébrale est réduite.

Fig. 1 La boussole neuronale, système d'orientation de la tête

ÉVEIL

1 Une souris dotée d'un implant capable d'enregistrer l'activité des neurones du cortex cérébral tourne la tête vers la gauche.

2 Dans le cortex de la souris, il existe un réseau de neurones spécifique à l'orientation de la tête : la boussole neuronale. Chaque neurone du réseau s'active pour une direction précise de la tête. Au moment où le rongeur tourne la tête, l'activité électrique se propage dans ce réseau.



SOMMEIL PARADOXAL

3 Bien que la tête de la souris soit immobile, les mêmes neurones s'activent dans le même ordre et à la même vitesse que pendant l'éveil. En observant l'activité de ces neurones, on sait que l'animal rêve qu'il tourne la tête vers la gauche.

INFOGRAPHIE : SYLVIE DESSERT

••• à celui de l'éveil, comme l'a montré le neurobiologiste Michel Jouvet dans les années 1950. Le fait est que, pendant le sommeil paradoxal, la séquence d'activité des neurones de la boussole neuronale est rejouée à la même vitesse que pendant l'éveil. Cette activité neuronale correspond à des mouvements plausibles de la tête, lorsque l'animal explore son environnement. Cela nous apprend deux choses : d'une part, que ces assemblées de neurones « connaissent » la manière dont les animaux se meuvent puisqu'elles s'activent à la même vitesse que pendant l'éveil. Les modèles internes de la souris seraient donc dynamiques. D'autre part, cela confirme de vieilles intuitions : pendant le sommeil, les entrées sensorielles liées à la tête (toutes les informations visuelles captées par le rongeur pendant ses déplacements) n'existent pas, et pourtant l'activité de ces assemblées de neurones est la même. En d'autres termes, pendant l'éveil, l'ensemble des stimuli sensoriels ne bouleverse que très peu les assemblées neuronales, supports biologiques de nos modèles internes du monde. Les stimuli ne font que délicatement les mettre à jour. Ces structures cérébrales sont déjà formées, prêtes à réagir aux infimes variations causées par l'environnement extérieur. Pour cette raison, certains neuroscientifiques voient l'éveil comme un rêve légèrement biaisé par des entrées sensorielles. De telles observations ont été aussi rapportées dans d'autres structures cérébrales, nous ne sommes qu'au début de cette exploration.

Certains neuroscientifiques voient l'éveil comme un rêve légèrement biaisé par des entrées sensorielles

Au cours de notre expérience, nous avons observé un autre phénomène : pendant la phase de sommeil paradoxal comme pendant l'éveil, les sous-groupes de neurones de la boussole neuronale s'activent pendant environ une demi-seconde en moyenne avant qu'un autre sous-groupe prenne le relais et s'active à son tour. Cette demi-seconde semble être la constante de temps d'une forme d'accès « conscient » à l'information qui, chez l'homme, correspond au temps nécessaire pour reporter verbalement le contenu d'une sensation, quelle qu'elle soit. C'est ce que Benjamin Libet, psychologue de l'université de San Francisco, a appelé en anglais le *mind time*. Cela peut paraître extrêmement long, mais c'est le temps subjectif dans lequel nous vivons. Évidemment, nous sommes capables – et heureusement – de réagir plus vite que cela pendant l'éveil. Cependant, cela nous prend un certain temps pour interpréter ce que certains systèmes nerveux réflexes de notre corps viennent de faire : on ne réagit jamais « consciemment » à une glissade sur la glace en hiver, on ne réalise qu'après coup, par terre ou debout selon les cas, ce qui vient de se passer et les mouvements que l'on a tenté d'exécuter pour se rattraper. Le fait que cette dynamique, apparemment lente, soit observée aussi pendant le sommeil nous apprend qu'elle est donc nécessairement contrainte par des facteurs physiologiques internes et non par la dynamique du monde extérieur comme on pourrait le penser.

COMPRENDRE LE SOMMEIL PARADOXAL

De nombreuses questions restent en suspens quant à la façon dont ces modèles internes dynamiques sont formés : est-ce génétique ? Est-ce développemental ? Cette dynamique peut-elle encore changer à l'âge adulte ? Au vu de la diversité des opinions qui règnent dans la communauté scientifique, les paris sont ouverts. Il a fallu des centaines de millions d'années d'évolution pour qu'émergent des réseaux de neurones suffisamment complexes pour construire de tels modèles internes du monde. Même si le rôle du sommeil paradoxal reste largement incompris et sujet à toutes sortes de débat, il est en tout cas certain qu'il est apparu uniquement chez les ordres animaliers aux facultés cognitives les plus avancées : les mammifères et les oiseaux. Une des clés de la compréhension du sommeil paradoxal réside alors peut-être dans cette idée : il serait nécessaire de retourner à un état quasi similaire à l'éveil pour apprendre, mémoriser et donc internaliser ce qu'est l'espace, le temps et donc la dynamique. Quelles que soient les théories qui émergeront sur le rôle du sommeil, l'activité de notre cerveau endormi a encore beaucoup à nous apprendre sur ce qu'est l'éveil, sur nos facultés de percevoir le monde et d'y agir aussi efficacement que possible. ■

(1) M.A. Wilson & B.L. McNaughton, *Science, 265,* 676, 1994 ; G. Buzsaki *et al., Science, 256,* 1025, 1992.
(2) Peyrache *et al., Nature Neuroscience, 18,* 569, 2015.

histoire.presse.fr

■ Au commencement, l'eau et la boue ■ Marchands et navigateurs à la conquête du monde ■ Là où le peuple ne se révolte pas ■ La République idéale ■ Une terre d'accueil ■ 1516 : le premier ghetto ■ Casanova, c'est Venise ■ Au carnaval tout est permis ! ■ Sous le joug autrichien ■ Une ville comme les autres ?

Avec **Anna Bellavitis, Gilles Bertrand, Patrick Boucheron, Philippe Braunstein, Catherine Brice, Donatella Calabi, Claudie Campagne-Ibarcq, Jean-François Chauvard, Élisabeth Crouzet-Pavan, Jean-Claude Hocquet, Claire Judde de Larivière, Maurice Lever, Johann Petitjean, Salvatore Settis, Xavier Tabet**

en kiosque et sur smartphone

Télécharger dans l'App Store

DISPONIBLE SUR Google play

3

« Une heure trente de sieste suffit à un enfant pour mieux mémoriser »

Dormir permet de se souvenir. Tel est le constat du neuropsychologue Philippe Peigneux qui étudie l'impact du sommeil sur la mémoire à court terme et à long terme.

Propos recueillis par Mathias Germain

PHILIPPE PEIGNEUX

1996 Il commence avec Pierre Maquet des travaux de recherche sur le sommeil et la mémoire au Cyclotron de l'université de Liège.
2000 Grâce au PET-scan, les deux chercheurs et leurs collègues réussissent à prouver que les structures cérébrales impliquées dans l'apprentissage continuent à fonctionner pendant le sommeil.
2006 Il fonde et dirige l'unité de recherches Neuropsychologie et neuro-imagerie fonctionnelle à l'université libre de Bruxelles.

La Recherche **Pendant le sommeil, que fait le cerveau ? Il semble qu'il travaille toujours…**

Philippe Peigneux En effet, le cerveau est toujours en activité mais il change de mode de fonctionnement et connaît deux phases d'activité : une où l'activité électrique est comparable à celle de l'éveil alors que le corps du dormeur n'a pas de tonus musculaire. Celle-ci, identifiée dans les années 1950 par deux pionniers dans l'étude du sommeil, l'Américain William Dement et le Français Michel Jouvet, a été appelée par le premier « sommeil à mouvement oculaire rapide », et par le second, « sommeil paradoxal ». Pendant cette phase, on estime que l'activité cérébrale globale est égale voire supérieure à celle de la journée. Une autre phase se caractérise par des ondes lentes de grandes amplitudes qui reflètent une activité synchronisée de larges ensembles de neurones : le « sommeil à ondes lentes ».

Cette activité cérébrale nocturne serait liée en partie à la consolidation de la mémoire ?

Oui, la théorie admise est que pendant le sommeil lent, les informations seraient transférées de l'hippocampe vers le cortex, où elles seraient stockées à long terme. En observant l'activité métabolique des neurones, avec Pierre Maquet à Liège, nous avons constaté que le sommeil paradoxal a aussi un rôle : les zones qui s'activaient à l'éveil pendant l'apprentissage d'une procédure (apprendre à faire du vélo) étaient réactivées (1).

De quelles mémoires s'agit-il ?

Pour schématiser, deux grands types de mémoire sont consolidés pendant le sommeil : la mémoire dite « déclarative » et la mémoire procédurale. La mémoire déclarative est liée aux événements vécus ou aux apprentissages de concepts théoriques tels que des définitions de mots. La mémoire procédurale concerne les techniques acquises, par exemple faire du vélo ou jouer du piano, et qu'on peut utiliser de manière plus ou moins consciente. Pour définir la mémoire, il faut aussi prendre en compte la notion de durée. Ainsi, la mémoire à court terme enregistre temporairement les événements qui s'enchaînent dans nos vies. C'est un visage croisé dans la rue ou un numéro de téléphone entendu qui se dissipera rapidement et à tout jamais si on ne fait pas un effort conscient pour se le rappeler. La mémoire à court terme va permettre le passage de l'information dans la mémoire à long terme. C'est dans le cadre de cette consolidation à long terme que le sommeil joue un grand rôle. Dormir sert à mieux se souvenir.

Quelles sont les aires cérébrales impliquées dans la mémoire des événements ?

On considère que l'hippocampe est l'une des principales régions du cerveau impliquée dans la mémoire déclarative. Cette implication découle notamment des observations réalisées sur Henry Gustav Molaison. En 1953, à la suite d'une chirurgie visant à diminuer ses crises d'épilepsie,

▲ *Philippe Peigneux s'intéresse depuis la fin des années 1990 aux processus de consolidation d'une nouvelle information dans la mémoire humaine.*

DR

son hippocampe a été retiré. Cette ablation entraîna de façon inattendue une sévère amnésie. Il était incapable de former de nouveaux souvenirs épisodiques. Il avait perdu la mémoire des événements précédant sa chirurgie, mais se souvenait toujours de certains, plus anciens, comme ses souvenirs d'enfance. De nombreuses observations tendent à confirmer que l'hippocampe rejoue, au moment du sommeil, l'activité qui a eu lieu pendant l'apprentissage. Mais au bout d'un certain temps, quand on sollicite à nouveau la personne à propos d'un apprentissage, on s'aperçoit que l'hippocampe n'est plus sollicité mais que ce sont des aires situées dans le cortex préfrontal qui le sont. Nous en déduisons qu'il y a eu un transfert.

Ce transfert des souvenirs au sein du cerveau a-t-il été confirmé par des expériences ?

Oui. Nous avons réalisé avec Pierre Maquet et Steffen Gais une expérience avec des jeunes adultes bien portants (2). Cela consistait à mémoriser des listes d'associations de mots. Pendant cet apprentissage, on observait chez chacun d'entre eux les aires cérébrales en activité. Ensuite, une partie de ces volontaires était privée de sommeil. Deux jours après, tous étaient interrogés pour vérifier s'ils avaient mémorisé la liste de mots. Pendant la restitution, on observait que l'hippocampe était très actif. Six mois plus tard, les personnes étaient à nouveau interrogées. Chez celles qui avaient bénéficié d'une nuit de sommeil après l'apprentissage, l'hippocampe n'était plus autant sollicité. C'était des zones dans le cortex préfrontal qui étaient activées. Ces résultats indiquent que la nuit de sommeil après l'apprentissage initie le transfert des informations de l'hippocampe vers des zones du cortex pour une mémoire à long terme.

Ce processus est-il le même chez les enfants ?

Oui, mais le transfert entre l'hippocampe et le cortex semble beaucoup plus rapide. •••

“Le sommeil après l'apprentissage initie le transfert des informations de l'hippocampe vers des zones du cortex pour une mémoire à long terme”

••• Des résultats récents suggèrent que, chez l'enfant, un sommeil d'une heure trente après l'apprentissage suffirait (3). Nous avons réalisé avec Charline Urbain une expérience sur un groupe d'enfants en bonne santé, âgés en moyenne de 10 ans. Nous avons utilisé la magnétoencéphalographie (MEG) pour visualiser ce qui se produit dans leur cerveau, puis nous leur avons présenté une série d'images d'objets, connus et inventés. À chaque objet inventé correspondait une définition à apprendre. Sans surprise, l'hippocampe était fortement sollicité lors de cet apprentissage. Après quoi, un groupe d'enfants a pu faire une sieste de 90 minutes, tandis que l'autre restait au calme. Tous sont ensuite retournés dans la machine (MEG). On leur présentait alors les images d'objets, connus et inventés, et ils devaient donner leur définition. Résultat : les enfants qui n'ont pas dormi ont moins bien réussi que ceux qui ont fait la sieste. Surtout, nous avons remarqué que chez ces enfants, ce n'était plus l'hippocampe qui était activé pendant l'exercice mais des zones du cortex préfrontal. Il s'agissait des mêmes zones qui étaient activées pour donner les définitions des objets connus, et des mêmes zones visualisées dans l'expérience précédente chez les adultes au bout de six mois ! La consolidation de la mémoire semble donc bien plus rapide chez les enfants.

La consolidation de la mémoire devient-elle moins efficace avec l'âge ?

C'est ce que suggèrent des études comportementales et réalisées à partir de l'imagerie par résonance magnétique (IRM). Des expériences de mémorisation ont montré qu'avec l'âge, les oublis étaient plus nombreux après le sommeil. Une étude a comparé des personnes de plus de 65 ans et des jeunes adultes dans le cadre d'un apprentissage de liste de mots (4). Trente minutes après l'apprentissage, quand on interroge les participants, les performances entre les deux groupes sont équivalentes. Mais quand on les teste une semaine après, les jeunes adultes ont de meilleurs résultats. Avec l'âge, le sommeil change. En moyenne, il est plus fragmenté. Il comporte de moins en moins de phases de sommeil lent profond. Le manque de sommeil lent profond est-il le seul responsable de cette baisse d'efficacité de la mémoire ? Nous manquons de données pour l'affirmer. En outre, avec l'âge, la plasticité cérébrale (la capacité du cerveau à réorganiser des réseaux de neurones en fonction d'un apprentissage) diminue, ce qui peut affecter à la base la qualité d'une information.

Le sommeil est-il aussi bénéfique pour la mémoire procédurale ?

Moins d'études ont été faites dans ce domaine et les résultats diffèrent. Par exemple, le sommeil semble bénéfique pour apprendre à pianoter des séquences. Mais pour apprendre des mouvements de compensation, comme compenser le décalage entre une souris d'ordinateur et la flèche cible sur un écran, le sommeil ne semble pas apporter de bénéfice. Les apprentissages procéduraux s'optimisent pendant le sommeil mais on n'observe pas de transfert entre différentes aires cérébrales.

L'activité cérébrale pendant le sommeil peut-elle favoriser l'émergence de nouvelles idées ?

Crier « eurêka ! » en se levant le matin, tout le monde en rêve… Otto Loewi, Prix Nobel en 1936 pour sa découverte des principes chimiques de la transmission de l'influx nerveux, a raconté qu'il s'était réveillé un jour avec l'idée de l'expérience qui allait confirmer l'existence de ces neurotransmetteurs. Cela dit, des expériences ont montré que le sommeil pouvait favoriser la découverte d'une règle cachée et de liens logiques. L'équipe de Jan Born à l'université de Lübeck a réalisé une expérience avec des adultes à partir de séries de chiffres (5). Il s'agissait de résoudre un problème à partir d'une série d'opérations successives. Au cours de la journée, les participants apprenaient ces opérations. Mais on ne leur dévoilait pas qu'il y avait une méthode plus rapide. Ensuite, un groupe a pu profiter d'une nuit de sommeil alors que l'autre en était privé. Le lendemain, tous ont recommencé l'exercice. Ceux qui avaient dormi étaient devenus bien plus performants. En fait, ils avaient découvert dans leur sommeil la méthode plus rapide (la règle cachée) pour parvenir au résultat.

Et serait-il possible d'apprendre une leçon en l'écoutant tout en dormant ?

C'est le rêve de tous les étudiants… Une équipe

de l'Institut Weizmann, en Israël, a réalisé une expérience qui va dans ce sens. Elle a soumis des personnes endormies à deux sons différents, sans les réveiller. Ces sons étaient associés à une odeur. Le son A était associé à une bonne odeur, le son B à une mauvaise. Or les odeurs provoquent des réflexes respiratoires : la présence d'une mauvaise odeur entraîne automatiquement une inspiration plus faible. Donc dès que le dormeur respirait la mauvaise odeur associée au son B, son amplitude respiratoire diminuait. Le conditionnement était réalisé chez les dormeurs soit pendant la phase de sommeil profond, soit pendant le sommeil paradoxal. Le lendemain, l'équipe de l'Institut a fait écouter aux participants les sons A et B. Elle a constaté une modification réflexe de la respiration à l'écoute du son B chez ceux qui avaient été conditionnés pendant leur sommeil profond. Ces personnes avaient donc mémorisé dans leur sommeil l'association entre le son et la mauvaise odeur. Évidemment, avec ce type d'expérience, on est loin d'apprendre son cours de maths pendant le sommeil. Mais elle suggère que les fonctions cognitives ne sont pas totalement déconnectées du monde extérieur pendant le sommeil.

En outre, d'autres expériences récentes ont démontré qu'il était possible de renforcer la mémorisation au cours du sommeil. Par exemple, l'équipe de Ken Paller à l'université Northwestern, aux États-Unis, a montré qu'un indice sonore pendant la sieste permettait de renforcer la mémorisation de séquences musicales (6).

Pour enregistrer l'activité cérébrale de l'homme pendant le sommeil, quelles sont les techniques ?

L'électroencéphalographie est la technique la plus courante. On pose des électrodes sur le cuir chevelu de la personne. Le signal électrique provenant des neurones est amplifié et enregistré. Mais cette technique a une limite : il est difficile de repérer précisément la provenance du signal électrique, notamment s'il provient de groupes de neurones situés en profondeur du cerveau. Mais le développement des techniques dans les années 1990 comme l'IRM ou la tomographie à émissions de positons (TEP ou PET-scan), ont permis d'affiner les observations de l'activité cérébrale.

Aujourd'hui, vous utilisez la magnéto-encéphalographie (MEG), pourquoi ?

La MEG est une technique de mesure des champs magnétiques induits par l'activité électrique des neurones du cerveau. Les champs magnétiques mesurés étant extrêmement faibles, il est nécessaire de l'utiliser dans une pièce très isolée des interférences extérieures. Mais cette technique comporte plusieurs avantages : nous pouvons retrouver la source d'un signal à la milliseconde près, même en profondeur, car un champ magnétique n'est pas dévié. Pas besoin d'utiliser de produits radioactifs comme pour le PET-scan. Et puis cette technique n'est pas bruyante comme l'IRM, ce qui est plutôt utile quand on étudie des personnes qui dorment… ■

(1) P. Maquet *et al., Nature Neuroscience, 3,* 831, 2000.
(2) S. Gais *et al., PNAS, 104,* 18778, 2007.
(3) C. M. Urbain *et al., NeuroImage,* doi: 10.1016/j neuroimage.2016.03.055, 2016.
(4) A. Mary *et al., Front Psychol., 4,* 750, 2013.
(5) U. Wagner *et al., Nature, 427,* 352, 2003.
(6) J. W. Antony *et al., Nature Neuroscience, 15,* 1114, 2012.

Pour en savoir plus

Livres

■ Francis Eustache et Bérangère Guillery-Girard, *La Neuroéducation, la mémoire au cœur des apprentissages,* Odile Jacob, 2016.
■ Michel Jouvet, *Le Sommeil, la Conscience et l'Éveil,* Odile Jacob, 2016.
■ Francis Eustache (dir.), *Les Troubles de la mémoire : prévenir et accompagner,* Éditions Le Pommier, 2015.
■ Isabelle Arnulf, *Une fenêtre sur les rêves,* Odile Jacob, 2014.
■ Francis Eustache et Béatrice Desgranges, *Les Chemins de la mémoire,* Éditions Le Pommier, 2010.
■ Isabelle Arnulf et Delphine Oudiette, *Comment dormons-nous ?* Éditions Le Pommier, 2008.

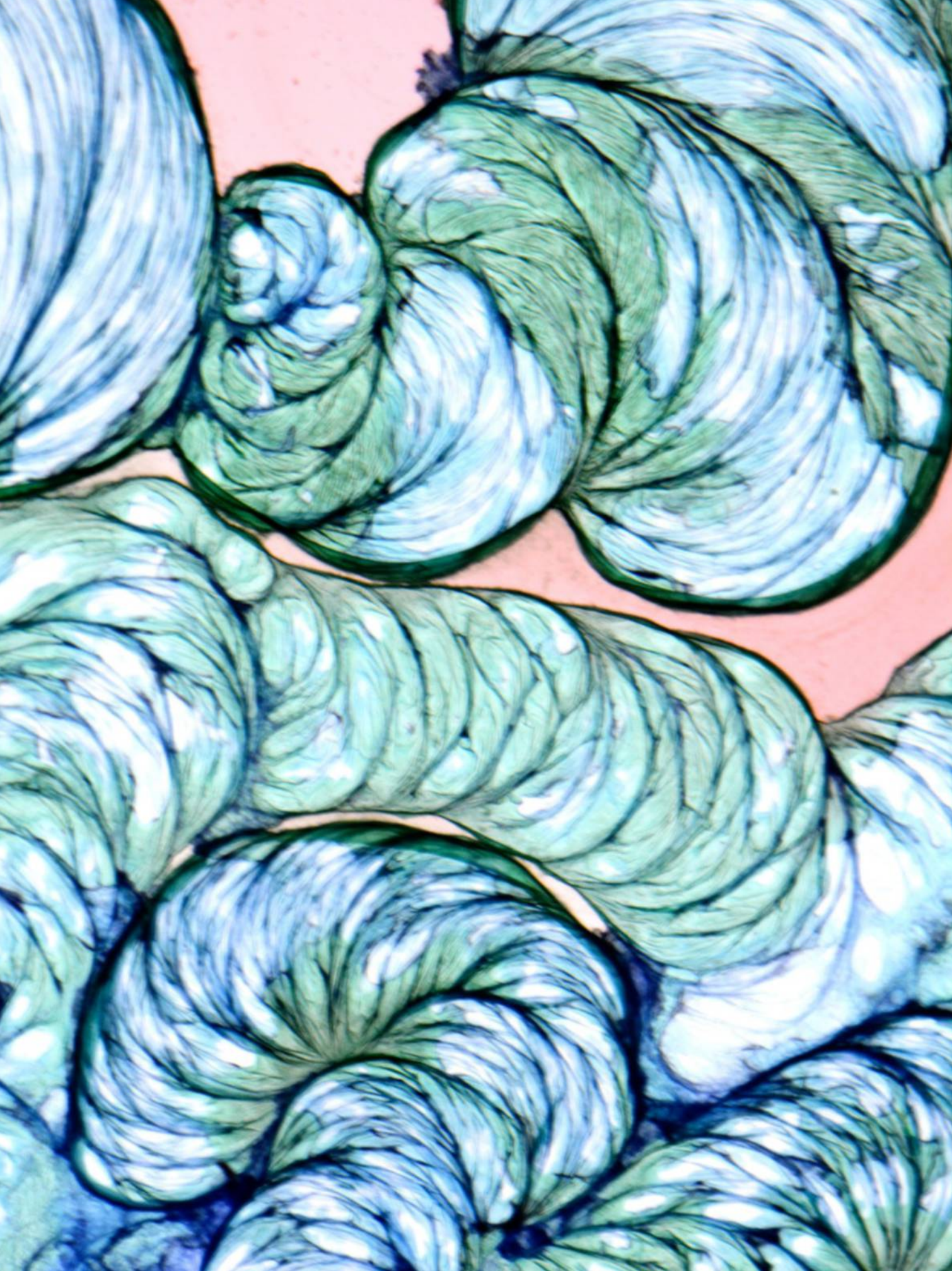
Sur le Web

■ **memorya.org** est un jeu documentaire scientifique sur Internet. Il propose une exploration ludique et illustrée des multiples facettes de la mémoire avec l'éclairage de la science d'aujourd'hui.

■ **http://www.observatoireb2vdesmemoires.fr** Le site internet de l'Observatoire B2V des mémoires contient de nombreuses informations sur la compréhension des mémoires humaines et sur les moyens de les entretenir.

La Recherche a publié

■ D. Forget, « Les nouveaux neurones balaient certains souvenirs », n° 495, janvier 2015, p. 34.
■ Dossier « Sommeil et rêves : ce que révèlent les neurosciences », n° 454, juillet-août 2011, p. 42.
■ S. Gruszow, « Une trace physique de la mémoire », n°437, janvier 2010, p. 55.
■ Spécial Mémoire : « Nouveaux regards sur le cerveau », n° 432, juillet-août 2009, p. 34.



Physique P. 60
Biologie P. 65

Chimie

Les nouvelles variétés des jardins chimiques confinés

Des chercheurs obtiennent, de manière reproductible et contrôlée, de magnifiques concrétions minérales aux motifs variées, futures candidates pour de nouveaux matériaux.

Florence Haudin, Fabian Brau, Julyan Cartwright, physiciens, **et Anne De Wit,** physico-chimiste

Sculpture, fleur génétiquement modifiée, corail atypique, champignon ? Non ! Ces structures minérales colorées aux formes fascinantes sont le fruit d'une réaction chimique courante : une réaction de précipitation, une réaction chimique dont le produit, peu soluble dans le solvant, apparaît sous forme solide. Avec une pointe de poésie, on appelle cela un « jardin chimique ». Depuis que le chimiste allemand Johann Rudolf Glauber les a observées pour la première fois en 1646 (1), ces concrétions minérales n'ont cessé de captiver les scientifiques. Au début du XX^{e} siècle, le biologiste et chimiste français Stéphane Leduc, inspiré par leur grande diversité de formes, pensait même avoir identifié les mécanismes physico-chimiques à l'origine des différentes morphologies des organismes vivants (2). Des résultats rapidement contestés.

Depuis une vingtaine d'années, c'est sur le lien entre les jardins chimiques et la genèse de la vie que se concentre l'intérêt des chercheurs. Étonnante coïncidence : les jardins chimiques partagent en effet les mêmes mécanismes physiques de formation que les cheminées hydrothermales, ces cheminées de plusieurs dizaines de mètres que l'on trouve au fond des océans et que l'on soupçonne être à l'origine de l'apparition de la vie sur Terre sous sa forme la plus rudimentaire. Des chercheurs utilisent ainsi les jardins chimiques tels des laboratoires miniatures, afin de reproduire les conditions observées dans les cheminées hydrothermales et tenter de comprendre l'émergence de la vie, du point de vue physico-chimique.

Les jardins chimiques pourraient par ailleurs aider à expliquer bien d'autres phénomènes, puisque l'on retrouve les mêmes mécanismes de formation de structures dans la nature, à de nombreuses échelles, par exemple celle des tubes nanométriques (un nanomètre vaut un milliardième de mètre) qui apparaissent lors de l'hydratation du ciment ou celle des *brinicles*, nom anglophone donné aux colonnes d'eau fortement salées qui se forment en mer sous la glace. Ils présentent aussi des avantages beaucoup plus concrets : ce sont des candidats prometteurs •••

Repères

- **Les jardins chimiques sont des structures minérales produites par une réaction de précipitation.**
- **Ils permettent de produire des matériaux de composition et de forme variables.**
- **Une croissance en milieu confiné permet de contrôler leur formation et de la modéliser.**

Ces grands filaments annelés qui donnent une impression de relief (alors que tout est confiné entre deux plaques distantes de 0,5 millimètre) apparaissent lorsqu'on injecte la solution alcaline (ici, du silicate de sodium) dans la solution de sel métallique (ici, du chlorure de cobalt).

PHOTOS : FLORENCE HAUDIN/ESPCI

••• pour créer des structures auto-organisées de différentes compositions chimiques, ainsi que pour synthétiser de nouveaux matériaux. Ils sont, dans ce cadre, l'objet de nombreuses recherches en chimie, en physique et en science des matériaux. Par exemple, en tirant parti de la différence de composition chimique entre les parois interne et externe des tubes créés durant la croissance de jardins chimiques, on peut imaginer produire des dispositifs microfluidiques ayant des propriétés physico-chimiques particulières. Pour cela, il faudrait néanmoins parvenir à contrôler la croissance des tubes, ce qui est loin encore d'être le cas. De fait, presque quatre siècles après leur découverte, la compréhension des mécanismes de formation et des propriétés physico-chimiques des jardins chimiques reste lacunaire.

Le protocole pour les obtenir est pourtant simple. Il suffit de se procurer une solution aqueuse alcaline, de type silicate ou carbonate de sodium, et un sel métallique sous la forme de cristaux. Lorsqu'on sème ces cristaux tels des « graines chimiques » de taille variable dans la solution de silicate, un parterre de plantes minérales germe et croît avec des tiges solides plus ou moins tortueuses. Le type de métal utilisé permet de faire varier la couleur des structures émergentes : du fer pour une teinte rouge, du cuivre pour du bleu, du nickel pour du vert, etc.

Lorsqu'on sème ces cristaux dans la solution de silicate, des plantes minérales poussent avec des tiges solides plus ou moins tortueuses

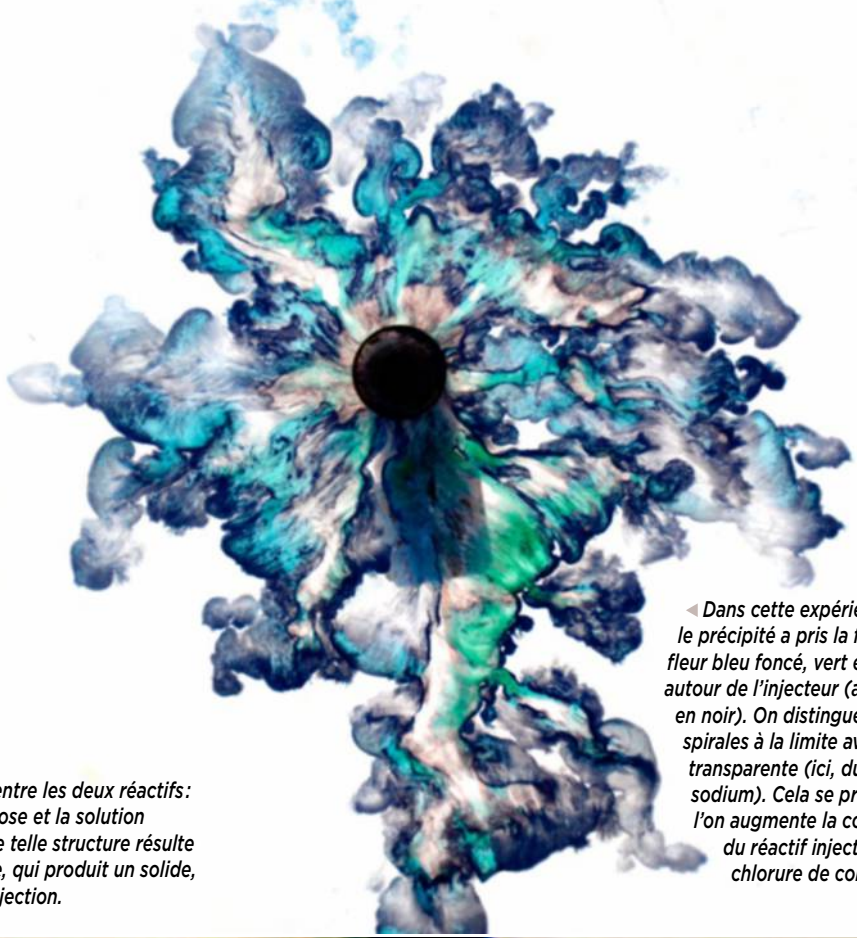
Fondamentalement, la formation des jardins chimiques implique une réaction de précipitation : comme lors de la formation du calcaire. Lorsque le cristal de sel métallique se dissout dans la solution alcaline, la réaction de précipitation entre les deux réactifs conduit à la formation d'une membrane semi-perméable autour du cristal, qui va laisser passer le solvant mais pas la substance dissoute. L'eau de la solution est alors pompée à l'intérieur de la membrane sous l'effet de la pression osmotique induite par la différence de concentration en sel métallique de part et d'autre de la membrane. Grâce à cet apport d'eau, la dissolution du sel métallique peut se poursuivre à l'intérieur même de la membrane, ce qui conduit à une augmentation de la pression. Au-delà d'une certaine pression, la membrane rompt localement et un jet de solution de sel métallique, généralement moins dense, monte alors dans la solution alcaline : la précipitation se poursuit, générant des concrétions solides et des tubes de taille variable.

EFFETS D'OSMOSE

Voilà pour la description simplifiée. La modélisation de cette dynamique de formation de jardins chimiques se heurte pourtant à d'énormes défis. La prédiction de leurs formes tridimensionnelles et de leurs propriétés n'est pas triviale non plus. En effet, la croissance de ces structures est erratique, incontrôlable, car elle implique plusieurs processus agissant simultanément : la diffusion moléculaire (c'est-à-dire la migration des molécules induite par l'agitation thermique), la précipitation de produits dont la concentration n'est pas maîtrisée, l'osmose (le passage du solvant – ici l'eau – de la solution la moins concentrée vers la solution de concentration plus importante, au travers de la membrane de précipité) et la poussée d'Archimède induisant des mouvements de fluide.

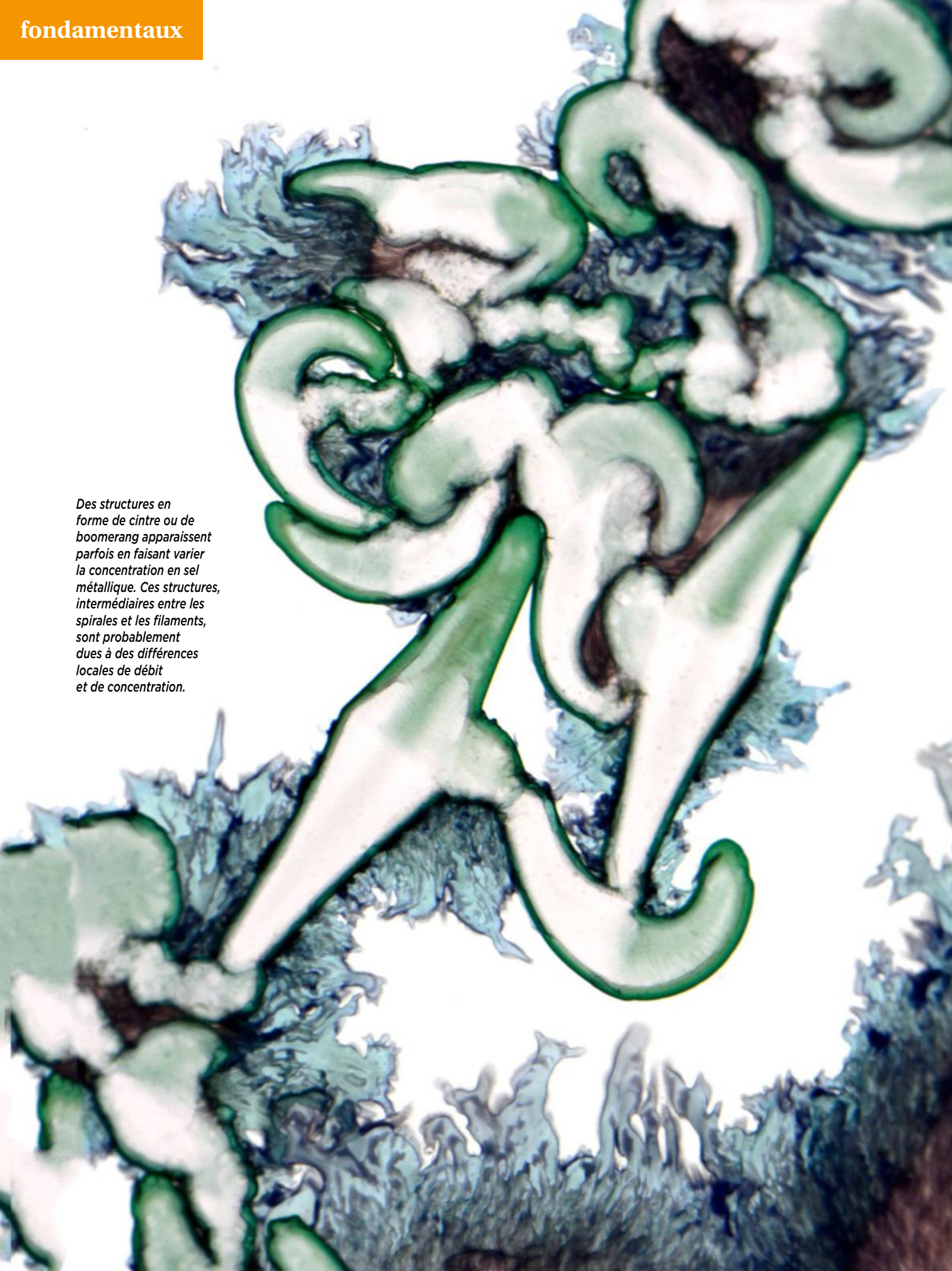
Plusieurs tentatives ont été réalisées pour séparer ces effets et mieux contrôler la croissance de ces structures. Des expériences en microgravité ont, par exemple, abouti à une croissance de tubes plus lente et dans des directions aléatoires. D'autres chercheurs ont essayé de dominer les effets d'osmose en injectant la solution de sel métallique dissous directement dans la solution alcaline de silicate. Ils sont ainsi parvenus à contrôler le débit d'injection et les concentrations des deux solutions, un premier pas pour maîtriser la croissance des tubes. D'autres études ont également montré qu'il est possible de guider la croissance des tubes à l'aide d'une bulle de gaz ou avec des faisceaux lasers. Tous ces systèmes restent néanmoins tridimensionnels et l'analyse de ces structures et leur modélisation sont particulièrement compliquées.

Dans notre laboratoire, pour tenter de contrôler la croissance des jardins chimiques et, à terme, de la modéliser, nous avons choisi une autre voie, inédite : étudier des réactions de précipitation dans un milieu confiné quasi bidimensionnel (3). Pour y parvenir, nous utilisons une cellule •••



◀ *Dans cette expérience, le précipité a pris la forme d'une fleur bleu foncé, vert et turquoise autour de l'injecteur (au centre, en noir). On distingue aussi des spirales à la limite avec la solution transparente (ici, du silicate de sodium). Cela se produit lorsque l'on augmente la concentration du réactif injecté (ici, du chlorure de cobalt).*

▼ *Cette spirale s'est formée à l'interface entre les deux réactifs : le sel métallique (chlorure de cobalt) en rose et la solution alcaline (silicate de sodium) en blanc. Une telle structure résulte de l'interaction entre la réaction chimique, qui produit un solide, et l'écoulement hydrodynamique dû à l'injection.*

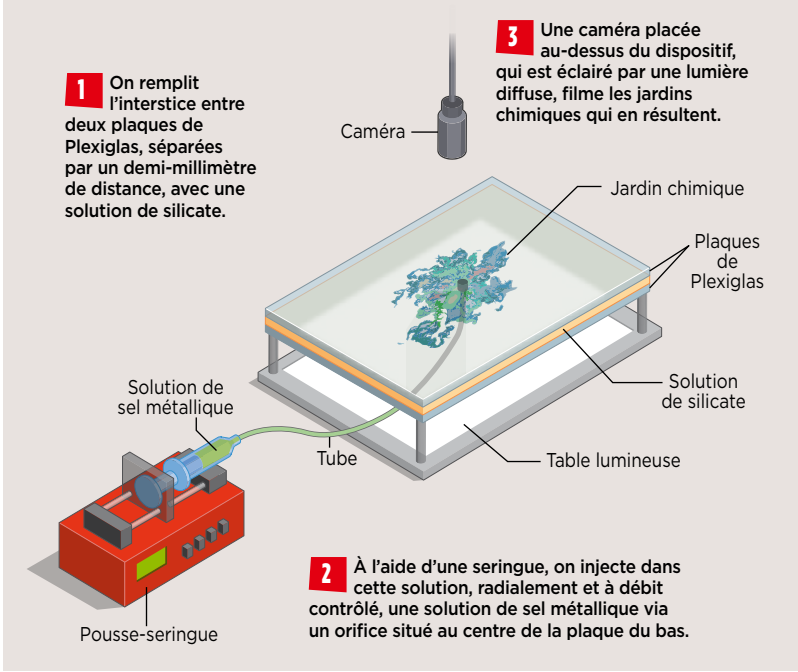


Des structures en forme de cintre ou de boomerang apparaissent parfois en faisant varier la concentration en sel métallique. Ces structures, intermédiaires entre les spirales et les filaments, sont probablement dues à des différences locales de débit et de concentration.

••• de Hele-Shaw, un dispositif couramment mis à profit pour étudier diverses instabilités hydrodynamiques, comme par exemple la digitation visqueuse obtenue quand un fluide déplace un autre fluide plus visqueux. La cellule de Hele-Shaw est composée de deux plaques transparentes en plexiglas séparées par un mince interstice (environ 0,5 millimètre) contenant un fluide. À l'aide d'un pousse-seringue, on y injecte un autre fluide par un petit orifice, situé au centre de la plaque du dessous. La cellule est placée au-dessus d'une table lumineuse et la dynamique est filmée. Pour contrôler les concentrations initiales des réactifs, au lieu d'initier la réaction en utilisant un cristal de sel métallique, nous utilisons les réactifs en solution. De plus, l'injection d'une solution dans l'autre réduit les effets de pression osmotique et de diffusion moléculaire alors que l'horizontalité du système diminue les effets induits par la gravité (Fig. 1).

Grâce à cette simplification expérimentale, nous avons observé et recensé un large éventail de motifs suivant la valeur des concentrations initiales des réactifs. Nos structures prennent la forme de protubérances que nous avons appelées lobes, de mèches hirsutes ressemblant à des cheveux, de petits filaments sinueux se frayant un chemin tortueux dans la solution de silicate et devenant verts au cours du temps, de motifs en forme de fleur et dans une large plage de conditions, de structures directionnelles et annelées, rappelant des vers, ou de précipités formés d'arcs de spirales. Pour divers types de sels, nous sommes capables de reproduire les mêmes formes de ces structures pour des domaines de concentrations similaires (4). Il reste cependant à comprendre en détail leur mécanisme de formation.

Fig. 1 Cultiver un jardin chimique


1 On remplit l'interstice entre deux plaques de Plexiglas, séparées par un demi-millimètre de distance, avec une solution de silicate.
3 Une caméra placée au-dessus du dispositif, qui est éclairé par une lumière diffuse, filme les jardins chimiques qui en résultent.
Caméra
Jardin chimique
Plaques de Plexiglas
Solution de silicate
Table lumineuse
Solution de sel métallique
Tube
Pousse-seringue
2 À l'aide d'une seringue, on injecte dans cette solution, radialement et à débit contrôlé, une solution de sel métallique via un orifice situé au centre de la plaque du bas.

SPIRALES DE TYPE LOGARITHMIQUE

L'autre avantage de taille de ce système quasi bidimensionnel est que les structures obtenues peuvent être aisément étudiées avec des outils standard d'analyse d'images. Ce qui permet in fine d'essayer de comprendre et de modéliser leur croissance. C'est ce que nous avons fait pour les spirales, le motif présentant le plus de régularité. Nous avons proposé un modèle géométrique qui permet de décrire leur croissance. Il est en très bon accord avec celles des spirales observées lors de nos expériences. Nous avons montré que cette croissance conduisait à des spirales de type logarithmique, fréquemment rencontrées dans la nature. On les retrouve par exemple chez certains coquillages, chez certaines plantes ou dans la forme des cornes de certains animaux lorsque la matière est ajoutée au cours du temps à l'une des extrémités tout en préservant la forme globale de la structure (5).

Il reste de nombreuses étapes à franchir pour comprendre les mécanismes de formation de toutes les structures obtenues dans nos expériences et les caractériser tant du point de vue de leur composition chimique que de leurs propriétés physiques. Néanmoins, ces résultats ouvrent une nouvelle voie vers une production contrôlée de précipités en milieu confiné. Ils font partie des premières tentatives de modélisation de ces processus de croissance. Affiner ces modèles suppose néanmoins d'améliorer encore notre capacité à contrôler la forme des différentes structures avant de pouvoir envisager une modélisation plus globale du système. ■ *(Suite page 58)*

(1) L.M. Barge *et al., Chemical Reviews, 115,* 8652, 2015.
(2) Stéphane Leduc, *La Biologie synthétique,* A. Poinat, 1912.
(3) F. Haudin *et al., PNAS, 111,* 17363, 2014.
(4) F. Haudin *et al., Phys. Chem. Chem. Phys., 17,* 12804, 2015.
(5) D'Arcy W. Thompson, *On Growth and Form,* Macmillan, 1942.

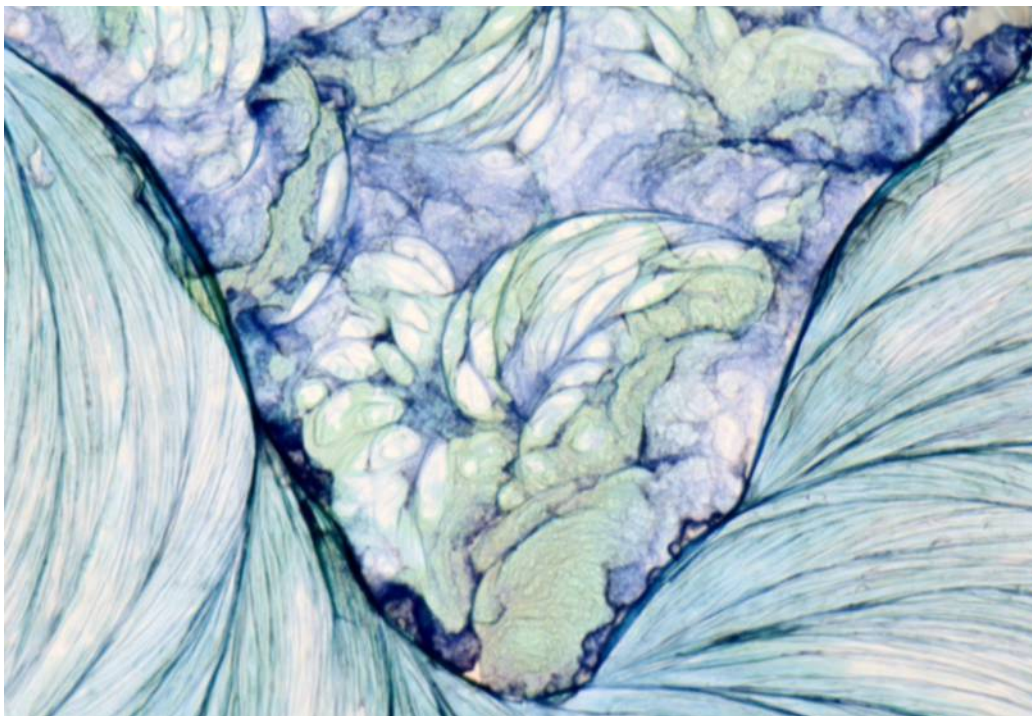
Pour en savoir plus

■ **http://tinyurl.com/sc-amusante-jardin-chimique**
Une page à destination des professeurs de collège et de lycée, afin qu'ils réalisent leurs propres jardins chimiques avec leurs élèves.

■ **http://tinyurl.com/paris-diderot-jardin-chimique**
L'université Paris-Diderot a mis en ligne une vidéo montrant la croissance de jardins chimiques.

INFOGRAPHIE : BRUNO BOURGEOIS

Lorsqu'un grand filament annelé fait un coude, on peut observer dans son creux des structures qui semblent tressées. Ce sont en fait des filaments de taille plus petite.



En utilisant un débit d'écoulement beaucoup plus faible que dans toutes les autres expériences, on peut voir des structures qui ressemblent à des tiges, branches ou bourgeons verts. Cela rappelle les expériences du biologiste et chimiste Stéphane Leduc, qui utilisait les jardins chimiques afin de comprendre la morphologie des végétaux.

Si la solution injectée (ici, du chlorure de cobalt et du sucrose) est plus visqueuse que la solution alcaline (ici, du silicate de sodium), il peut se former une structure qui semble stratifiée: ces couches sont dues à des fuites dans les parois des filaments (les « serpents » aux bords noirs).

Physique

La quête de la plus rare des désintégrations

Comprendre pourquoi la matière domine l'Univers est une question essentielle. Mais pour y répondre, il faudra détecter un phénomène particulièrement rarissime.

Matthew Chalmers, journaliste, et **Jean-Clément Nau,** traducteur

Cet article a été traduit du *New Scientist* du 13 février 2016.

Repères

- **Au moins huit expériences cherchent à détecter la double désintégration bêta d'un noyau sans émission de neutrino.**
- **Le seul cas de cette désintégration atomique observé jusqu'à présent est controversé.**
- **La mise en évidence de cette désintégration obligerait à modifier le statut des neutrinos dans le modèle standard de la physique des particules et ouvrirait sur une nouvelle physique.**

Même si vous observiez l'Univers depuis sa naissance, vous auriez vraiment peu de chance d'apercevoir ce phénomène. Les physiciens, eux, ne se laissent pas décourager par cet espoir minuscule. À travers le globe, des milliers d'entre eux se préparent à partir à la recherche d'un des mécanismes naturels les plus rares : une forme de désintégration radioactive qui, si elle était observée, pourrait bien nous permettre de comprendre pourquoi l'Univers contient quelque chose plutôt que rien. La désintégration radioactive est l'alchimie de la nature, capable de transformer certains isotopes (*) d'éléments lourds en éléments plus légers. Elle obéit toutefois à son propre calendrier : certains éléments ont des durées de vie de quelques minutes, d'autres de plusieurs millénaires. Ces processus radioactifs sont les garants de notre propre existence : l'un d'entre eux, la désintégration bêta, contribue à l'alimentation en énergie du Soleil. Le type de désintégration bêta le plus courant provoque la transformation d'un neutron en proton ; un électron et un antineutrino (le partenaire d'antimatière du neutrino) sont alors éjectés (Fig. 1). En 1935, des physiciens ont émis l'hypothèse selon laquelle certains noyaux pouvaient subir deux désintégrations bêta à la fois. Cette forme de désintégration – la plus rare de toutes – ne survient dans un noyau donné qu'une fois par période de 10^{19} à 10^{21} ans. Mais sur une collection d'atomes assez importante, les probabilités d'assister au phénomène augmentent : nous l'avons observé dans onze noyaux lourds (1).

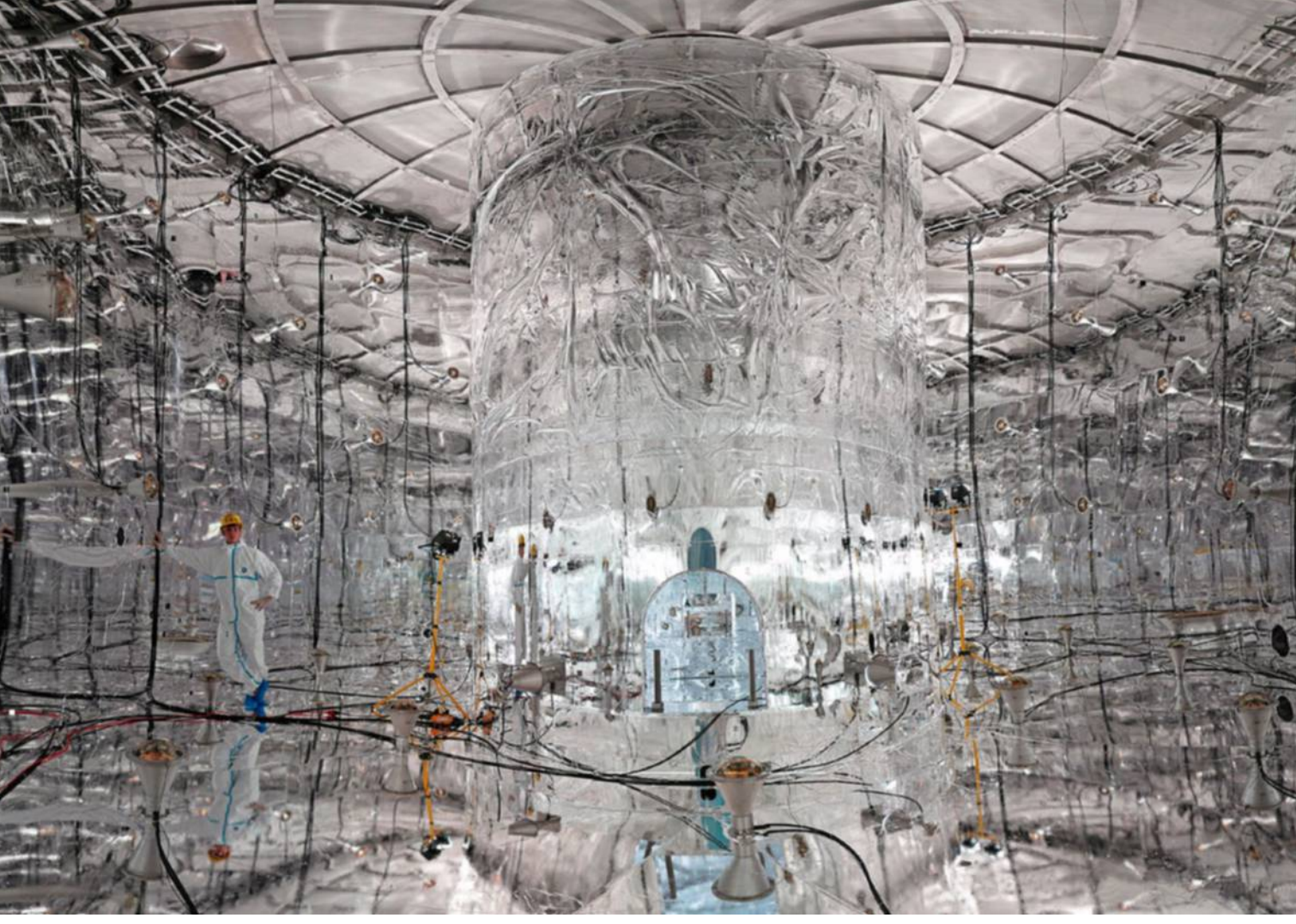
NEUTRINOS DE MAJORANA

Question rareté, ces désintégrations n'arrivent toutefois pas à la cheville du phénomène que les chercheurs tentent aujourd'hui d'observer : la double désintégration bêta sans émission de neutrino. Cette dernière implique la transformation de deux neutrons en deux protons et deux électrons, sans qu'un seul antineutrino soit produit.

Pour que ce numéro d'escamotage se produise, il faut qu'un phénomène remarquable survienne. Les deux antineutrinos doivent se neutraliser l'un l'autre. Cela rappelle la manière dont les particules et leurs antiparticules s'annihilent mutuellement lorsqu'elles entrent en contact. Toutefois, pour que ces deux particules identiques se neutralisent, il faut que les neutrinos et leurs antiparticules soient une seule et même entité : à la fois matière et antimatière. Pour Steve Biller, de l'université d'Oxford, on ne retrouve cette caractéristique pour « *aucune autre particule* » élémentaire de matière.

Ce ne serait pas la première fois que les neutrinos contrediraient des théories établies. Leur découverte expérimentale remonte certes à 1956, mais

(*) **Les isotopes** sont les différentes formes d'un élément chimique qui se distinguent par le nombre de neutrons contenus dans leur noyau.



▲ *L'intérieur de l'expérience internationale Gerda en cours d'installation dans le tunnel du Gran Sasso, sous les Alpes italiennes. Au centre, le détecteur sera constitué de 40 kg de germanium ultrapur au sein duquel on espère qu'une désintégration double bêta sans neutrino se produira.*

F. FREUD, GERDA COLLABORATION

il nous reste beaucoup de choses à découvrir à leur sujet. Et ce, en partie, parce qu'ils ne se soucient guère du reste de l'Univers : chaque seconde, des milliards de neutrinos partent du Soleil et nous traversent. Franchir une épaisseur de plomb d'une année-lumière ne les effraierait pas : la plupart en ressortiraient indemnes. La simple question de savoir si les neutrinos avaient une masse n'a été élucidée qu'au début des années 2000. Et cette découverte a été jugée si importante qu'elle a, l'an dernier, valu un prix Nobel de physique à ses auteurs. En revanche, nous ignorons encore pourquoi leur masse est bien plus petite que ne le prévoit le modèle standard de la physique des particules et pourquoi il existe trois « saveurs » (ou familles) de neutrinos, chaque saveur étant associée à un lepton chargé (électron, muon, tau).

En 1937, le jeune physicien italien Ettore Majorana a prédit que les neutrinos ayant une masse posséderaient une caractéristique intrigante. En tant que seule particule élémentaire de matière dépourvue de charge électrique, il leur serait théoriquement possible d'être leur propre antiparticule. Si les neutrinos ont cette propriété – s'ils sont « de Majorana » –, la distinction entre matière et antimatière est obsolète. Les neutrinos de Majorana peuvent interagir entre eux et briser la symétrie entre production de matière et d'antimatière. Autrement dit, si les neutrinos sont de Majorana, cela pourrait expliquer comment une petite quantité de matière est parvenue à échapper à l'annihilation dans les premiers instants de l'Univers, pour former les étoiles, les planètes… et nous.

DÉSINTÉGRATION FONDAMENTALE

« Notre existence même pourrait être liée à la masse des neutrinos et à la double désintégration bêta sans émission de neutrino », explique Werner Rodejohann, de l'Institut Max-Planck de physique nucléaire, à Heidelberg. Selon lui, la découverte d'une telle désintégration constituerait une avancée majeure. Une avancée qui serait en un sens plus fondamentale encore que l'observation du boson de Higgs, qui n'avait fait que confirmer un modèle théorique établi de longue date. •••

••• À l'inverse, la détection d'une double désintégration bêta sans émission de neutrino montrerait que les théories actuelles de la physique sont incomplètes, et indiquerait dans quelle direction les orienter à l'avenir.

Le problème est qu'après plus d'un demi-siècle de recherche, on n'a observé qu'un seul cas supposé d'une telle désintégration. Cette observation a été rapportée en 2001 au laboratoire italien de Gran Sasso (2). Elle est communément appelée « désintégration de Klapdor-Kleingrothaus », du nom du chercheur, prénommé Hans, de l'université d'Heidelberg qui a défendu son observation pendant plus d'une décennie. La plupart des physiciens sont restés dubitatifs, mais ce résultat a néanmoins éveillé l'intérêt de toutes les personnes concernées par cette désintégration. *« Nous aurions adoré jouer avec de nouveaux principes de physique, mais s'il avait fallu prendre les paris, tout le monde aurait reconnu que c'était plus qu'improbable »*, explique Steve Biller.

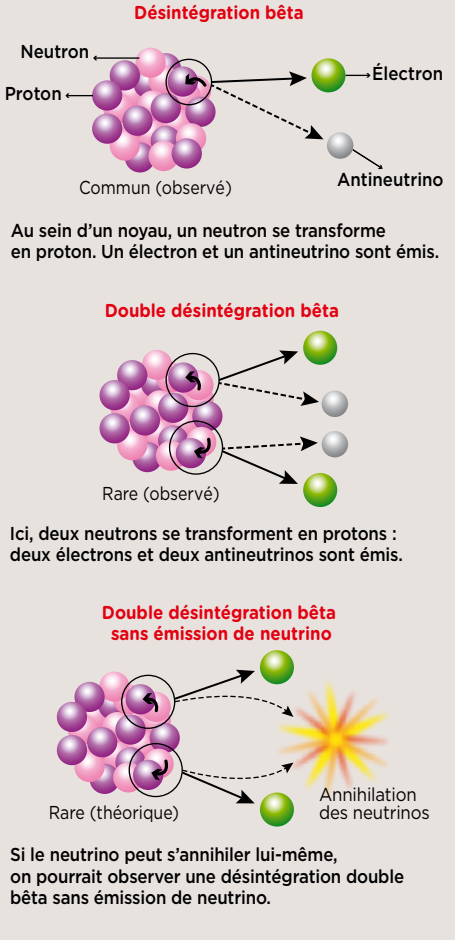
ISOTOPE IDÉAL

La volonté de confirmer ou d'infirmer l'événement Klapdor-Kleingrothaus a engendré une forte période d'activité dans ce secteur. Elle a inspiré la réalisation de trois expériences au Gran Sasso, en Italie, dans l'État du Nouveau-Mexique et au Japon. Ces dernières années, les trois expériences semblent avoir conclu que cet événement ne s'était pas produit. Steven Elliott, du Los Alamos National Laboratory au Nouveau-Mexique, s'en réjouit : selon lui, les spécialistes de ce domaine peuvent enfin cesser de tenir compte de ce cas supposé dans l'élaboration des prochaines étapes de leurs recherches. Ces trois expériences de grande ampleur ont aussi affiné notre évaluation de la durée de vie de la désintégration, repoussant à 10^{25} années la période d'attente minimale pour avoir une chance d'apercevoir la désintégration d'un noyau individuel via une double désintégration bêta sans neutrino.

Mais l'espoir est encore permis. Il existe aujourd'hui une dizaine d'expériences (nouvelles ou remaniées) cherchant à observer le processus, et ces détecteurs pourraient bien être assez sensibles pour le débusquer. Ils opèrent tous peu ou prou de la même manière : s'il faut attendre trop longtemps pour voir la désintégration d'un seul noyau, il suffit d'en rassembler assez pour réduire ce temps. Autrement dit, il suffit dans le principe d'amasser un isotope extrêmement pur dans des quantités aussi importantes que possible en profondeur : sous terre, il est protégé des bombardements de particules cosmiques (ces derniers peuvent fausser la détection en mimant le signal recherché). Et d'attendre que l'un des noyaux de ces isotopes se désintègre selon le mécanisme recherché.

Reste que la tâche est ardue. Les équipes en question cherchent à détecter des événements si rares que le rayonnement radioactif naturel ne peut excéder un événement par an et par tonne de matière. Même une banane (en raison de sa concentration en potassium à l'état de traces) émet environ 15 désintégrations radioactives par seconde, ce qui est plus que suffisant pour masquer le signal recherché.

Fig. 1 Radioactivité bêta


Désintégration bêta
Neutron
Proton
Électron
Antineutrino
Commun (observé)
Au sein d'un noyau, un neutron se transforme en proton. Un électron et un antineutrino sont émis.
Double désintégration bêta
Rare (observé)
Ici, deux neutrons se transforment en protons : deux électrons et deux antineutrinos sont émis.
Double désintégration bêta sans émission de neutrino
Rare (théorique)
Annihilation des neutrinos
Si le neutrino peut s'annihiler lui-même, on pourrait observer une désintégration double bêta sans émission de neutrino.

INFOGRAPHIES : MICHÈLE BOURGEOIS

Seule une poignée d'isotopes sont à la fois assez sensibles et assez abondants pour être utilisés dans des expériences d'une telle envergure. Chacun d'entre eux présente des avantages, mais le germanium est aujourd'hui le plus prisé. Sa forme cristalline compacte permet d'obtenir un appareil plus dense, capable de mesurer de manière très précise l'énergie des deux électrons émis ; les physiciens peuvent alors distinguer avec plus de facilité les véritables désintégrations et les événements de fond. Gerda, l'expérience au Gran Sasso (qui a contribué à discréditer la désintégration Klapdor-Kleingrothaus), se prépare aujourd'hui à utiliser 40 kilogrammes de germanium. Son principal rival, le Majorana Demonstrator, installé dans les profondeurs d'une ancienne mine d'or située sous la ville américaine de Lead, dans le Dakota du Sud, est sur ses talons. Au cours de l'été, ce dernier aura commencé à recueillir des données grâce à un appareil utilisant 44 kg de germanium.

Cet effort conséquent ne sera sans doute pas suffisant. *« Selon nos estimations les plus optimistes quant à la demi-vie de cette désintégration particulière, il nous faudra un détecteur d'au moins une tonne pour être certains de capter un signal »*, explique Juan José Gómez Cadenas, de la collaboration Next, en Espagne, qui utilise du xénon (Fig. 2). Une quantité proche de la limite des ressources pouvant être rassemblées pour une expérience isolée – ce qui signifie que les chercheurs devront coopérer. *« Le vent est en train de tourner ; la compétition se transforme en coopération »*, résume Gómez Cadenas.

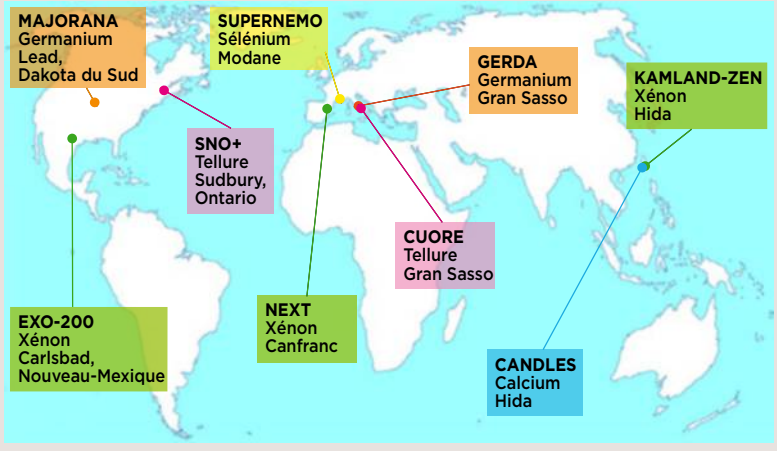
Les spécialistes des expériences Majorana et Gerda ont passé un accord : si rien n'est découvert d'ici à 2018, ils uniront leurs forces pour bâtir la première expérience utilisant plus d'une tonne d'isotopes optimisés. Il leur faudra obtenir au moins dix tonnes de germanium brut pouvant être purifié – soit près de 10 % de l'approvisionnement mondial annuel (qui sert en temps normal aux entreprises technologiques visant à construire des puces informatiques plus performantes). Mais même si une désintégration était observée dans un isotope, il faudrait la confirmer à l'aide d'un autre isotope. La découverte de la double désintégration bêta sans émission de neutrino étant pressentie comme la promesse d'un futur prix Nobel, les spécialistes devront prendre garde à ne pas pécher par excès d'enthousiasme. Les responsables de l'expérience Majorana ont pris des mesures pour prévenir ce type de biais : Steven Elliott, le porte-parole du projet, explique qu'ils réaliseront une analyse en aveugle : *« Nous n'analysons qu'une petite quantité de données ; le reste est mis sous clé jusqu'au moment convenu. »* Mais, là encore, même si elle

La découverte de la double désintégration bêta sans neutrino est pressentie comme la promesse d'un prix Nobel

parvenait à prouver l'existence de cette désintégration, l'expérience à elle seule ne suffirait pas à démontrer que les neutrinos de Majorana en sont les responsables. Des mécanismes plus complexes pourraient également être à l'origine de cette rare désintégration ; des particules inconnues joueraient alors le rôle que l'on prête aux neutrinos.

Il est malaisé de distinguer de tels mécanismes, mais de nouvelles expériences seront bientôt ajoutées à l'arsenal des physiciens. Parmi elles figure Katrin, en cours d'élaboration en Allemagne, qui vise à déterminer la masse des trois neutrinos fondamentaux une fois pour •••

Fig. 2 Les détecteurs de la désintégration



▲ **Partout à travers le monde, des collaborations internationales se mettent en place en vue d'observer une double désintégration bêta sans neutrino. Le matériau du détecteur est le plus souvent un solide (germanium, sélénium, etc.), plus rarement un gaz (xénon).**

D-MAPS.COM (FOND)

••• toutes (pour l'instant, on ne dispose que d'encadrement du carré de leurs masses). L'expérience américaine Dune devrait indiquer quelle masse est associée à quelle saveur. Selon Werner Rodejohann, si la double désintégration bêta est bel et bien provoquée par les neutrinos de Majorana, alors les physiciens pourront utiliser les données recueillies pendant ces expériences pour calculer la durée de vie du processus. En outre, ils pourront déterminer si ces résultats correspondent à ceux obtenus via les recherches directes. *« S'ils ne correspondent pas, alors c'est un autre phénomène qui provoque la double désintégration bêta sans neutrino – ce qui serait proprement fascinant et spectaculaire. »*

De fait, ce type de résultats pourrait s'avérer des plus précieux. L'existence de tels mécanismes a été prédite par une série de théories aujourd'hui directement étudiées au sein du Grand Collisionneur de hadrons, le LHC, au Cern. Parmi elles, on trouve certaines variantes de la supersymétrie – une théorie grâce à laquelle on espère pouvoir unifier les interactions fondamentales.

Pourtant, notamment dans le domaine de la physique, les solutions les plus simples se révèlent souvent les meilleures – et c'est là un autre avantage potentiel des neutrinos de Majorana : ils permettraient de comprendre l'extrême légèreté des neutrinos dans leur ensemble. C'est le champ de Higgs qui confère une masse à la plupart des particules élémentaires. Son omniprésence a été prouvée en 2012 par la découverte, au LHC, de sa particule associée, le boson de Higgs. Mais la faible masse des neutrinos semble indiquer que ces particules interagissent rarement avec le champ de Higgs. Certains physiciens en ont conclu qu'un autre mécanisme générateur de masse devait être à l'œuvre.

PARTICULE CLÉ DE LA PHYSIQUE

La théorie la plus en vogue suggère qu'il existe en réalité deux variétés de neutrinos : les légers, omniprésents et qui nous traversent jour après jour – et un partenaire plus lourd, dont le poids surpasse largement celui de toute autre particule élémentaire. Cette configuration placerait les deux types de neutrinos sur une sorte de balançoire à bascule particulièrement déséquilibrée ; d'un côté, les membres extrêmement lourds de la famille face à leurs cousins plus légers.

Selon cette hypothèse, les neutrinos les plus lourds se seraient désintégrés durant les premiers instants de l'Univers, et aucune expérience imaginable ne permettrait de les ressusciter ; ils auraient ainsi laissé derrière eux seulement la variété plus légère. C'est là une solution mathématiquement élégante ; elle est avancée par la plupart des « théories de grande unification » – mais elle ne peut fonctionner que si le neutrino est une particule de Majorana. Autrement dit, un antineutrino distinct du neutrino ne peut exister.

Que la prochaine génération de détecteurs renforce ou non la théorie du neutrino de Majorana, elle nous permettra de mieux comprendre les étranges et merveilleux mécanismes dans lesquels les neutrinos sont impliqués. Et selon Steve Biller, cette particule sans prétention pourrait receler la clé de plusieurs grands mystères de la physique. *« À bien des égards, les neutrinos semblent particulièrement excentriques. En les étudiant, on risque fort de découvrir quelque chose d'étrange. »* Reste à espérer pouvoir percer leurs mystères avant la fin de l'Univers ! ■

(1) J. Beringer *et al., (Particle Data Group), Phys. Rev. D., 86,* 010001, 2012.

(2) H.V. Klapdor-Kleingrothaus *et al., Mod. Phys. Lett. A, 16,* 2409, 2001.

Pour en savoir plus

- http://neutrino.lbl.gov/majorana.htm
- www-project.slac.stanford.edu/exo
- www.liverpool.ac.uk/particle-physics/experiments/sno
- http://next.ific.uv.es/next
- http://nemo.in2p3.fr/nemow3
- https://crio.mib.infn.it/wigmi/pages/cuore.php
- www.mpi-hd.mpg.de/gerda
- www.awa.tohoku.ac.jp/kamlande

UNE QUESTION DE MATÉRIAU

Quel matériau utiliser pour détecter au mieux un événement aussi rare que la double désintégration bêta sans neutrino ? *« Tout est une question de compromis entre la disponibilité du matériau et son niveau de radioactivité naturelle pour la réduction du bruit de fond »*, explique Fabrice Piquemal, porte-parole de l'expérience SuperNemo, en cours d'installation au laboratoire souterrain de Modane dans le tunnel de Fréjus, sous les Alpes. Alors que beaucoup misent sur le germanium, SuperNemo a opté pour le sélénium qui présente l'avantage d'avoir un bruit de fond intrinsèque réduit. *« La raie d'émission qui résulte de la double désintégration bêta du sélénium 82, l'isotope que nous utilisons, est située à une énergie de 3 mégaélectronvolts (MeV), au-dessus de l'émission de la radioactivité naturelle due à la désintégration du thallium 208 dont la raie est à une énergie de 2,6 MeV. Nous avons du coup moins de bruit de fond que pour le germanium qui se désintègre, lui, en émettant une raie à 2,04 MeV »*, précise le physicien. Reste que le radon, gaz naturellement présent dans l'atmosphère, émet aussi une radioactivité naturelle plus faible, mais autour de 3,2 MeV. Pour se placer au-dessus et réduire encore le bruit de fond, il faudrait utiliser du néodyme 150, une terre rare que l'on commence à savoir enrichir et qui émet à 3,3 MeV. *« Pour l'instant, nous pourrons ajouter dans SuperNemo, à côté des 7 kilogrammes de sélénium prévus, une centaine de grammes seulement de néodyme 150 préparés au fin fond de la Sibérie par nos collaborateurs russes. Mais pensez que dans les mêmes conditions expérimentales, il suffirait de 40 kg de néodyme pour avoir la même sensibilité qu'avec une tonne de germanium »*, s'enthousiasme le chercheur.

Philippe Pajot

Des cellules pour décrypter le mécanisme de la progeria

Un enfant souffrant de la progeria vieillit de dix ans en un an. Un procédé génétique remarquable a permis de comprendre le processus de cette maladie rare.

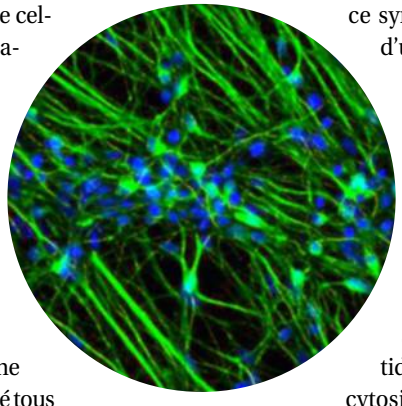
Xavier Nissan, biologiste

Dans son roman intitulé *La Machine à explorer le temps*, publié en 1895, H. G. Wells imaginait possible de voyager dans le temps. Et si Shinya Yamanaka avait fait de ce rêve une réalité au niveau cellulaire ? Le procédé (nommé reprogrammation) inventé par ce biologiste japonais en 2006 permet de renvoyer n'importe quelle cellule adulte différenciée, une cellule de peau par exemple, à un état « souche », proche de celui observé dans les premières cellules de l'embryon. Un état qui leur confère de remarquables capacités, comme celles de se diviser indéfiniment et de pouvoir donner naissance, en théorie, à n'importe quelle cellule de l'organisme. Une capacité appelée « pluripotence », d'où le nom de ces cellules modifiées : iPS, pour cellules souches « induites à la pluripotence ».

Ce retour aux origines est réalisé grâce à l'injection de quatre gènes dans la cellule adulte différenciée (lire p. 66). Bien que ces cellules ne semblent pas avoir encore livré tous leurs secrets, leur découverte ouvre d'immenses perspectives thérapeutiques. Médecine régénérative, criblage de médicament, modélisation de maladies, médecine personnalisée… Depuis 2006, cette liste ne fait que s'allonger et semble n'avoir pour limite que celle de l'imagination des chercheurs qui travaillent sur ces cellules iPS. Je les utilise moi-même depuis 2010 pour étudier la progeria.

La progeria est une maladie génétique qui se caractérise par un vieillissement global, prématuré et accéléré. On estime que les enfants qui en sont atteints vieillissent de dix ans par an. Ce qui fait, qu'à l'adolescence, ils ont un corps de centenaire avec tous les dysfonctionnements liés à cet âge. C'est une des maladies génétiques les plus rares puisqu'elle ne touche que trois enfants en France, moins de 300 dans le monde, soit environ une naissance sur 4 à 8 millions.

Le mécanisme moléculaire à l'origine de ce syndrome est connu : il s'agit d'une mutation génétique. Une mutation *de novo*, c'est-à-dire qu'elle apparaît chez une personne sans qu'aucun de ses parents ne la possède dans son patrimoine génétique. Chez l'homme, le code génétique est composé de plusieurs milliards de nucléotides (*) alternant adénine (A), cytosine (C), guanine (G) et thymine (T). Ces mutations *(de novo)* apparaissent constamment dans notre génome sans pour autant avoir de •••



INSERM/NISSAN, XAVIER

▲ *Chez l'enfant atteint de la progeria, les neurones sont les seules cellules à rester intactes. Les capacités intellectuelles ne sont donc pas affectées.*

Repères

- **La progeria est une maladie génétique rare qui se caractérise par la présence d'une protéine toxique, la progérine.**
- **Grâce à l'utilisation de cellules souches pluripotentes induites (iPS), il a été démontré que les neurones ne produisaient pas de progérine.**
- **Un micro-ARN, appelé miR-9, est à l'origine du blocage de la fabrication de la progérine.**

(*) **Un nucléotide** est la molécule organique qui constitue l'élément de base de l'ADN ou de l'ARN.

••• conséquences fonctionnelles. Mais dans certains cas, en fonction du gène et de la position, elles peuvent entraver le fonctionnement de certains tissus, voire de l'organisme tout entier. En 2003, l'équipe de Nicolas Lévy, à Marseille, a identifié la mutation à l'origine de la progeria (1). Il s'agit d'un remplacement d'une cytosine par une thymine dans un gène nommé LMNA. Dans des conditions normales, ce gène code deux protéines, les lamines A et C, qui structurent le noyau des cellules et assurent des liaisons entre la chromatine (ADN embobiné autour de protéines) et la membrane du noyau. Dans le cas de la progeria, cette mutation entraîne la production d'une troisième protéine appelée « progérine » qui, elle, est toxique (Fig. 1). Son accumulation engendre une déformation de la membrane du noyau et altère l'organisation de l'ADN de la cellule. D'où le dysfonctionnement de nombreuses fonctions biologiques majeures telles que la prolifération ou la différenciation cellulaires.

De récentes études ont montré que cette protéine tronquée, la progérine, se retrouve aussi au cours du vieillissement normal mais seulement au-delà de 70 ans. Est-elle la cause ou la conséquence de ce vieillissement ? Bien que le débat soit encore ouvert, certains travaux récents montrent qu'elle y jouerait un rôle important.

Chez les enfants atteints de la progeria, l'accumulation de progérine se produit très tôt dans la plupart des cellules de l'organisme, limitant la croissance. Leur taille ne dépasse pas 1,10 m pour un poids de 15 kg. À cela s'ajoutent des fragilisations osseuses comme l'arthrose et l'ostéoporose, et des maladies cardiovasculaires qui finissent par provoquer la mort à l'adolescence. Les malades subissent un véritable condensé des maux de la vieillesse. Seul leur développement cognitif reste parfaitement normal. Ce qui suggère que les neurones ne sont pas affectés par la maladie.

▲ *Un enfant atteint de la progeria ne mesure pas plus de 1,10 m et souffre des maladies typiques du vieillissement qui entraînent la mort à l'adolescence.*

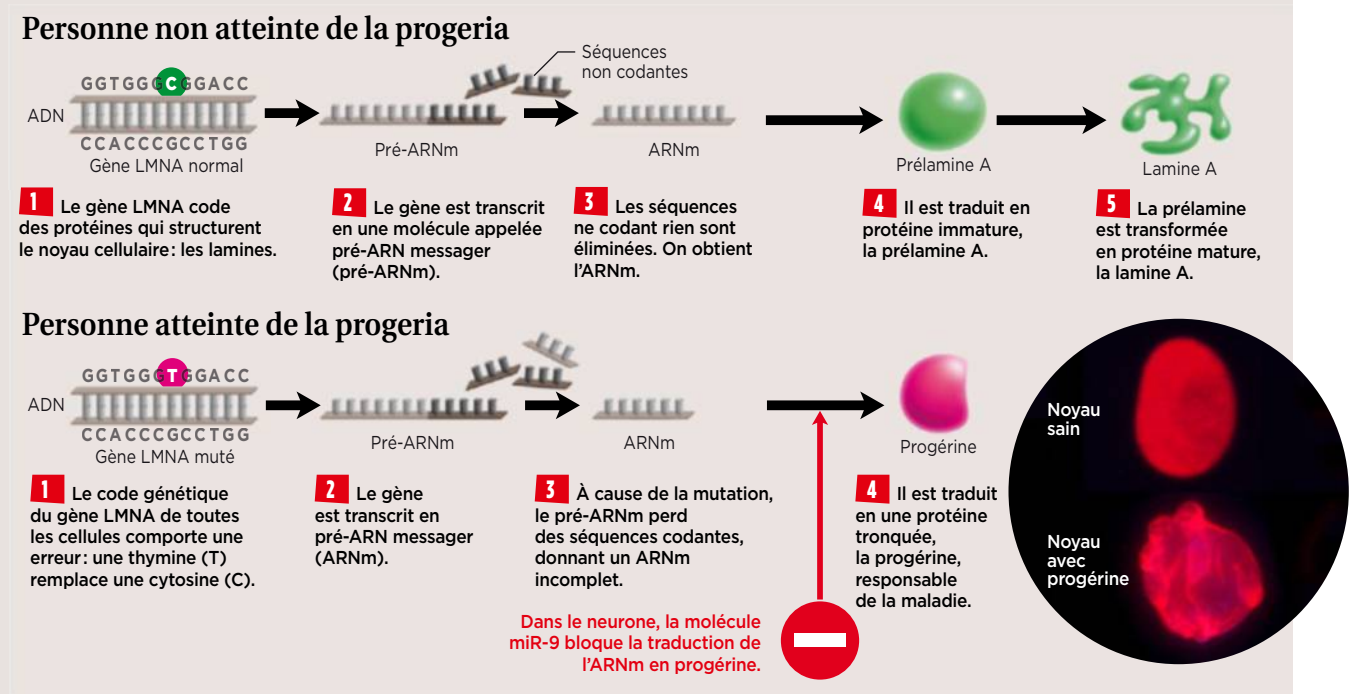
Les neurones échapperaient-ils à la progérine ? D'autres cellules seraient-elles dans ce cas ? Depuis longtemps, les chercheurs tentent de comprendre la maladie. Avant 2006, la très grande majorité des études réalisées in vitro ne portait que sur des cellules de soutien qu'on trouve facilement dans la peau, des fibroblastes primaires. Si ces cellules sont faciles d'accès, leur étude en l'état est peu pertinente pour répondre à ces questions. C'est là que la découverte de Shinya Yamanaka a ouvert de nouvelles possibilités. En

HISTOIRE D'UNE DÉCOUVERTE SCIENTIFIQUE

La découverte des cellules iPS a débuté en 1962, lorsque John Gurdon (colauréat avec Shinya Yamanaka du prix Nobel de médecine en 2012) a réussi à générer des têtards à partir d'œufs non fécondés en y transférant les noyaux de cellules intestinales de grenouilles adultes. Trente ans plus tard, c'est Ian Wilmut et ses collègues qui donnaient naissance, également par transfert nucléaire, à la brebis Dolly, premier mammifère cloné. Ces deux études, bien que différentes, ont un point commun. Elles démontrent que, même différenciées, toutes les cellules contiennent dans leur noyau l'information génétique nécessaire pour le développement d'un organisme entier. Ces travaux ont également supposé l'existence de facteurs capables de contrôler cette plasticité cellulaire. Shinya Yamanaka a eu l'idée de découvrir ces facteurs pour contrôler la pluripotence d'une cellule. Pour atteindre son but, Yamanaka s'est appuyé sur trente ans de recherches effectuées sur les cellules souches embryonnaires (ES). Il a ainsi établi une liste de 24 facteurs de transcription avec l'idée de forcer une cellule somatique à devenir une cellule pluripotente. En expérimentant stratégiquement les combinaisons possibles entre ces facteurs, il a identifié une combinaison de 4 facteurs (OCT4, SOX2, KLF4 et C-MYC) capable de renvoyer une cellule somatique à un état souche similaire à celui observé dans les premiers jours du développement embryonnaire. Cette découverte qui a maintenant presque dix ans, représente encore aujourd'hui la combinaison la plus utilisée pour produire des cellules iPS à travers le monde.

PHOTO COURTESY OF THE PROGERIA RESEARCH FOUNDATION/PROGERIARESEARCH.ORG

Fig.1 La fabrication de la progérine


Personne non atteinte de la progeria
ADN
GGTGGGCGGACC
CCACCCGCCTGG
Gène LMNA normal
Séquences non codantes
Pré-ARNm
ARNm
Prélamine A
Lamine A
1 Le gène LMNA code des protéines qui structurent le noyau cellulaire: les lamines.
2 Le gène est transcrit en une molécule appelée pré-ARN messager (pré-ARNm).
3 Les séquences ne codant rien sont éliminées. On obtient l'ARNm.
4 Il est traduit en protéine immature, la prélamine A.
5 La prélamine est transformée en protéine mature, la lamine A.
Personne atteinte de la progeria
ADN
GGTGGGTGGACC
CCACCCGCCTGG
Gène LMNA muté
Pré-ARNm
ARNm
Progérine
1 Le code génétique du gène LMNA de toutes les cellules comporte une erreur: une thymine (T) remplace une cytosine (C).
2 Le gène est transcrit en pré-ARN messager (ARNm).
3 À cause de la mutation, le pré-ARNm perd des séquences codantes, donnant un ARNm incomplet.
4 Il est traduit en une protéine tronquée, la progérine, responsable de la maladie.
Dans le neurone, la molécule miR-9 bloque la traduction de l'ARNm en progérine.
Noyau sain
Noyau avec progérine

utilisant sa technique de reprogrammation, nous avons transformé des fibroblastes prélevés chez différents patients en cellules iPS qui, comme les cellules souches embryonnaires, sont théoriquement capables de se différencier dans tous les types cellulaires de l'organisme. Permettre à des cellules qui vieillissent trop vite de remonter le temps… Il fallait être fou pour ne pas y penser! Entre 2011 et 2012, trois groupes de recherche dans le monde, dont le nôtre, ont montré qu'il était possible de générer des cellules iPS à partir de fibroblastes de patients (2).

Ces cellules iPS ont ensuite été différenciées en neurones, cellules osseuses ou cellules constituant les vaisseaux sanguins que nous avons étudiés in vitro. Nos travaux ont ainsi démontré que les cellules osseuses et vasculaires « progeria » présentaient tous les défauts fonctionnels précédemment décrits avec notamment une réparation défectueuse de l'ADN, une enveloppe nucléaire désorganisée, certains processus de différenciation accélérée et une sénescence prématurée… Des défauts qui expliquent les symptômes de ces malades. Mais ce travail nous a également permis d'observer que les neurones différenciés à partir de cellules iPS issues de patients ne produisaient pas de progérine et que leurs noyaux n'étaient pas déformés. Quel est le mécanisme qui bloque la production de cette protéine toxique dans les neurones? Et si on peut l'identifier, peut-on en faire un traitement? Cette idée a initié un projet de recherche qui nous a amenés à étudier plusieurs mécanismes connus en biologie comme étant capables de bloquer la synthèse d'une protéine dans un tissu précis. Ils peuvent avoir lieu au niveau de l'ADN ou de l'ARN messager.

Parmi toutes les pistes explorées, l'une s'est avérée payante, celle des micro-ARNs. Les micro-ARNs sont des petites molécules capables de s'apparier à l'ARN messager et de bloquer sa traduction en protéine. Les micro-ARNs peuvent avoir plusieurs milliers de cibles. Mais certains ne sont exprimés que dans des cellules très spécifiques. Nous avons donc recherché, par une approche bio-informatique, les micro-ARNs dont la composition chimique était susceptible de s'apparier à l'ARN messager issu du gène LMNA. Cette liste de micro-ARNs a ensuite été restreinte en la croisant avec celle de micro-ARNs spécifiquement exprimés par les neurones. Et là, à notre grande surprise, nous avons observé qu'il n'y avait qu'un seul micro-ARN qui répondait à tous ces critères, nommé miR-9, connu pour jouer un rôle important dans le développement du système nerveux central (cerveau et moelle épinière). Il est aussi impliqué dans la régulation de la •••

▲ *En présence de la lamine A, le noyau de la cellule est bien formé alors que la progérine le déforme.*

INSERM/NISSAN, XAVIER - INFOGRAPHIE: SYLVIE DESSERT

22 000

MOLÉCULES ONT ÉTÉ TESTÉES sur les cellules osseuses et vasculaires dérivées de cellules iPS « progeria ».

••• différentiation et dans l'activité neuronale. Pour vérifier expérimentalement notre hypothèse, nous avons tout d'abord confirmé la présence de miR-9 dans les neurones issus des cellules iPS « progeria ». Puis, nous l'avons introduit dans des cellules qui en sont dépourvues comme les cellules osseuses et avons observé que cela bloquait la synthèse de progérine et ramenait à la normale la structure de leurs noyaux. Les cellules iPS nous ont donc permis de décrypter le mécanisme qui protège le vieillissement des neurones dans la progeria. Ce miR-9 peut-il être utilisé comme traitement? Difficile à dire car il peut interagir avec plusieurs centaines d'autres cibles moléculaires et sa surexpression chez un patient peut entraîner un bouleversement moléculaire important. Pour le moment, miR-9 est à l'étude chez l'animal afin de vérifier qu'il n'interagit qu'avec la progérine… Un défi important pour la mise en place d'un traitement futur.

À ce jour, les patients atteints de progeria sont traités avec des inhibiteurs du processus de farnésylation (lire ci-dessous). En effet, dès que le lien entre la farnésylation de la prélamine A et la progeria a été fait, des chercheurs ont rapidement essayé d'inhiber cette réaction chimique pour éviter que la progérine ne se fixe dans la membrane du noyau. Ainsi, dès 2007, deux protocoles d'essai clinique ont débuté, l'un à Boston, l'autre à Marseille. Les deux stratégies reposent sur l'administration de médicaments déjà connus pour inhiber la farnésylation, soit des inhibiteurs de la farnésyltransférase elle-même (FTIs) (3), soit des composés agissant en amont de cette enzyme, la pravastatine et le zolédronate (ZoPra) (4). Les résultats de ces deux essais montrent que l'approche est efficace. Les patients vont mieux. Ils ne sont pas guéris mais certains de leurs symptômes sont significativement améliorés. Une première étape dans le traitement de la progeria a donc été franchie.

Mais peut-on aujourd'hui identifier de nouvelles molécules? À l'époque de ces travaux, les modèles cellulaires existants ne permettaient pas de tester à grande échelle les milliers de molécules déjà répertoriées par les laboratoires. Grâce à leurs propriétés d'autorenouvellement et de pluripotence, les cellules iPS permettent de produire à l'infini des cellules différenciées porteuses de la maladie.

VERS UN TRAITEMENT DE LA PROGERIA

Sur la base de nos précédents travaux, nous avons donc décidé d'utiliser les cellules osseuses et vasculaires dérivées de cellules iPS «progeria» pour mettre en place le premier test à grande échelle de molécules jamais effectué sur cette maladie. Nous avons ainsi expérimenté sur ces cellules près de 22 000 molécules et récemment identifié une nouvelle famille d'inhibiteurs de la farnésylation (5), les mono-aminopyrimidines (ou Mono-APs). Le chemin pour faire de ces composés un médicament est encore long, il faudra s'assurer de leur efficacité sur des modèles animaux avant d'envisager de les tester chez l'homme.

Cette découverte ouvre également de nouvelles perspectives pour le traitement de maladies associées à d'autres protéines farnésylées telles qu'un certain nombre de cancers. La recherche sur une maladie qui ne touche que trois enfants en France fait donc avancer celle sur des maladies beaucoup plus fréquentes…

Et finalement, pourquoi se limiter au processus de farnésylation? Pourquoi ne pas cibler directement la progérine? Et pourquoi ne pas chercher à corriger directement les phénotypes à l'origine de ce vieillissement? Toutes ces questions font l'objet d'une recherche intense à travers le monde et les cellules iPS pourraient jouer un rôle important pour y répondre… ■

(1) A. De Sandre-Giovannoli *et al, Science, 5628,* 2055, 2003.
(2) X. Nissan *et al., Cell, 2,* 1, 2012.
(3) S. H. Yang *et al., PNAS, 29,* 10291, 2005.
(4) I. Varela *et al., Nature Medicine, 14,* 767, 2008.
(5) S. Blondel *et al., Cell Death and Disease*, doi:10.1038 cddis.2015.374, 2016.

SYNTHÈSE D'UNE PROTÉINE IMMATURE

Les lamines sont des protéines utiles pour l'organisation du noyau d'une cellule. Pour fabriquer une lamine A, le gène LMNA doit être transcrit en ARN messager. Puis cet ARN est traduit en une préprotéine, la prélamine A. Un groupement chimique particulier, appelé groupement farnésyl (*), se fixe à la prélamine A. On parle de « farnélysation ». Cette réaction permet à la prélamine A d'intégrer la membrane du noyau. La prélamine A y subit de nouvelles réactions chimiques pour former la lamine A. Celle-ci entre dans le noyau et y assure ses fonctions. Mais la mutation à l'origine de la maladie bouleverse ce processus. La transcription du gène LMNA muté aboutit à un ARN messager incomplet. Lequel est à l'origine d'une prélamine A anormale appelée « progérine ». Grâce à la farnésylation, elle intègre la membrane du noyau. Mais elle ne peut pas subir les dernières étapes de maturation. La progérine s'accumule ainsi dans la membrane nucléaire.

(*) Un groupement farnésyl est une chaîne linéaire comportant 12 atomes de carbone, 3 substituants méthyl et 3 doubles liaisons.

La Recherche Complétez votre collection

LE MENSUEL
6,40€ le numéro

Année 2014

- N°486 avril 2014
  Dossier : Le génie d'Alexandre Grothendieck.
- N°487 mai 2014
  Dossier : T-Rex. Enquête sur la star des dinosaures.
- N°488 juin 2014
  Dossier : Bitcoin, la monnaie devient numérique.
- N°489 juillet-août 2014
  SPECIAL : La réalité n'existe pas.
- N°490 août 2014
  Les 40 livres de science indispensables.
- N°491 septembre 2014
  Dossier : Qui sont vraiment nos ancêtres ?
- N°492 octobre 2014
  Dossier : Incertitude quantique.
- N°493 novembre 2014
  Dossier : Comment savons-nous que nous sommes morts ?
- N°494 décembre 2014
  Dossier : Maths, les femmes prennent-elles le pouvoir ?

Année 2015

- N°495 janvier 2015
  Dossier : Les 10 découvertes les plus importantes de l'année.
- N°496 février 2015
  Dossier : L'origine de l'univers dévoilée.
- N°497 mars 2015
  Dossier : Stress, comment il modifie notre cerveau.
- N°498 avril 2015
  Dossier : Intelligence artificielle, jusqu'où iront les réseaux sociaux.
- N°499 mai 2015
  Dossier : Kilo, Ampère, Kelvin, Mole Pourquoi les physiciens redéfinissent les unités de mesure.
- N°500 juin 2015
  Dossier : Neurosciences. Comment l'empathie naît chez l'Homme.
- N°501-502 juillet-août 2015
  NUMÉRO DOUBLE
  Dossier : Les révolutions quantiques.
- N°503 septembre 2015
  Dossier : Trois stratégies pour vaincre Parkinson.
- N°504 octobre 2015
  Dossier : Terres en vue.
- N°505 novembre 2015
  Dossier : Comment le cerveau innove.
- N°506 décembre 2015
  Dossier : L'univers recréé en laboratoire.

Année 2016

- N°507 janvier 2016
  Dossier : Les 10 découvertes de l'année.

LES DOSSIERS DE LA RECHERCHE
6,90€ le numéro

Année 2013
SP02 : Les origines de la vie
SP03 : Les abysses
SP04 : Les particules élémentaires
SP05 : Jeux de mathématiques et de physique
SP06 : Addictions
SP07 : L'album de l'année 2013

Année 2014
NOUVELLE FORMULE
SP08 : L'intelligence artificielle
SP09 : Les nouvelles dimensions du son
SP10 : Piloter la machine par la pensée
SP11 : Internet, pour le meilleur et pour le pire
SP12 : La télévision du futur
SP13 : Comment les robots perçoivent le monde

Année 2015
SP14 : La lumière
SP15 : La conscience
SP16 : Einstein

Et pour conserver votre collection précieusement

➲ **l'écrin 12 numéros**
18€ seulement
(hors frais de port)

Retrouvez l'intégralité des numéros disponibles sur le site www.sophiaboutique.fr

Bon de commande

À retourner sous enveloppe affranchie à LA RECHERCHE
BP 65 - 24 chemin Latéral - 45390 Puiseaux - ✆ 33 (0) 2 38 33 42 89 - nchevallier.s@orange.fr

V512

Nom : Prénom :

Adresse :

Code postal : Ville : Pays :

Portable : E-mail : @

Pour recevoir plus rapidement des informations sur votre commande, merci de nous indiquer votre e-mail.

Oui, je souhaite recevoir dans les 10 jours la commande ci-dessous

Indiquez ci-dessous les numéros souhaités	Quantité	Prix unitaire	TOTAL
■ LA RECHERCHE		6,40 €	€
■ LES DOSSIERS DE LA RECHERCHE		6,90€	€
■ L'écrin LA RECHERCHE 12 numéros		18,00 €	€
FRAIS DE PORT : France métropolitaine (Étranger, nous contacter) **1,50€** le numéro / **+ 0,50€** le numéro supplémentaire **6,85€** l'écrin / **8,35€** de 2 à 3 / **9,10€** de 4 à 5 Au-delà de 5 écrins, nous contacter.			€
Total de ma commande (Frais de port inclus)			€

Je règle aujourd'hui par :

❒ chèque à l'ordre de *SOPHIA PUBLICATIONS* ❒ carte bancaire

N°

Je note aussi les 3 derniers chiffres du numéro inscrit au dos de ma carte bancaire, au niveau de la signature : Expire fin :

Signature obligatoire :

Votre commande sera expédiée à réception de votre règlement.

Loi informatique et libertés : vous disposez d'un droit d'accès et de rectification des données vous concernant. Elles pourront être cédées à des organismes extérieurs sauf si vous cochez la case ci-contre ☐

BRUNO BOULESTIN

Chercheur d'os

L'anthropologue Bruno Boulestin profite de sa retraite militaire pour offrir ses connaissances au monde académique. Portrait d'un scientifique au destin exceptionnel.

Denis Delbecq, journaliste

À dix ans, Bruno Boulestin fouillait secrètement avec deux copains les carrières proches de Ruelle-sur-Touvre, en Charente, ville où il a grandi. Quarante ans plus tard, les meilleurs préhistoriens consultent cet anthropologue renommé, en espérant qu'il pourra les éclairer sur le sens de sépultures préhistoriques énigmatiques qu'ils ont découvertes. *« Bruno est un amateur, au sens très fort du terme »*, résume son ami José Gomez de Soto, directeur de recherche émérite au CNRS, à l'université de Rennes. Leurs destins se sont croisés en 1978, quand le jeune Bruno est venu travailler l'été sur un chantier de fouilles que dirigeait José Gomez de Soto. *« En archéologie, il y a toujours eu beaucoup de bénévoles. Mais aujourd'hui, ce sont surtout des étudiants pas toujours très motivés. Les amateurs de très haut vol sont une espèce quasiment disparue. Je n'en connais que deux en France, et Bruno est l'un d'eux. »*

Il faut dire que Bruno Boulestin s'est forgé un destin et une culture scientifiques hors norme : ancien médecin militaire, il a pris sa retraite après vingt-cinq années de service dans la grande muette. Des années qu'il rongeait son frein, attendant de pouvoir se consacrer exclusivement à sa passion, fort de deux doctorats en médecine et en anthropologie. À 53 ans, dans le bureau aménagé de sa maison d'Angoulême, qui n'aurait rien à envier à celui d'Indiana Jones, le frêle quinquagénaire est intarissable au milieu de ses livres et de caisses d'ossements qui attendent de repartir chez leur propriétaire.

« Avec mes copains d'école, nous rêvions d'aventures archéologiques imaginaires, raconte Bruno Boulestin, *nous étions fascinés par l'Égypte et les pharaons. »* À l'époque, le personnage d'Indiana Jones n'avait pas encore germé dans l'esprit fertile de George Lucas. Mais il est sûr qu'il aurait pu être le héros de ces gamins qui battaient la campagne en espérant tomber sur des vestiges, comme des tombes gallo-romaines.

C'est donc tout naturellement qu'à 15 ans Bruno Boulestin se propose pour participer aux fouilles conduites par José Gomez de Soto dans la grotte du Quéroy, un site riche de vestiges d'occupation de l'âge du Bronze découvert en 1936 à Chazelles, en Charente. *« On voyait arriver beaucoup d'adolescents que les parents souhaitaient occuper pendant les vacances, alors on doutait de leur véritable motivation,* se souvient l'archéologue. *On l'a testé dans des endroits ingrats pour voir ce qu'il avait dans le ventre. Il a vite démontré son intérêt réel et son opiniâtreté. »* Et c'est ainsi que Bruno Boulestin travaillera jusqu'en 1994 sur les chantiers dirigés par son mentor. *« Ensuite, c'est moi qui ai travaillé sous sa direction, jusqu'à son dernier chantier il y a trois ans. »*

DE LA MÉDECINE À L'ANTHROPOLOGIE

À l'école, ce fils unique n'affichait pas une grande motivation. Pour le mettre sur les rails, ses parents l'envoient en pension dans un lycée militaire, le Prytanée, près du Mans. *« Mon père était alors chef de travaux civil des Constructions et armes navales,* justifie Bruno. *Je suis allé au Prytanée à reculons, mais j'ai été très heureux là-bas. »* Tout en sachant que chaque été portait la promesse d'un nouveau chantier de fouilles. En

YOHAN BONNET / HANS LUCAS POUR LA RECHERCHE

terminale, il passe – comme tous ses camarades de classe – le concours d'entrée à Santé navale, l'école de médecine militaire. *« Cela servait de préparation au bac, et je l'ai eu. La médecine m'intéressait, j'ai donc saisi l'opportunité et je suis parti à Bordeaux. »* Puis, en 1983, alors qu'il est en 4e année de médecine, l'étudiant s'inscrit en maîtrise de sciences à l'université de Bordeaux, pour y suivre l'enseignement en anthropologie. Quatre ans plus tard, il profite de la souplesse permise pour les sujets de thèse de médecine et choisit une étude des restes humains de la nécropole des Duffaits, en Charente, avec la complicité de José Gomez de Soto bien sûr.

Mais le jeune diplômé sait qu'il ne pourra pas tout de suite se consacrer à sa passion : les médecins militaires doivent servir dix ans sous l'uniforme. *« Comme officier, je savais que je pourrais être à la retraite au bout de vingt-cinq années, études comprises. Alors j'ai pris mon mal en patience, même si j'ai eu beaucoup de plaisir à exercer car la médecine militaire est beaucoup plus variée que la médecine de ville. »*

“ Je pense que beaucoup de gens ne savent pas que je suis bénévole. Ils me croient chercheur au CNRS ! ”

En 1992, il entame sa seconde thèse, en anthropologie cette fois. Et en 1996, l'armée l'envoie à Rosny-sous-Bois, en Seine-Saint-Denis. *« Je travaillais à temps partiel pour l'Institut de recherche criminelle de la gendarmerie nationale, dans le département d'anthropologie et de thanatologie. On étudiait des ossements pour identifier les victimes et rechercher les causes de la mort. J'espérais devenir anthropologue dans ce département, mais la réorganisation du service de santé* •••

Bruno Boulestin

BIO

20 MARS 1963: Naissance à Soyaux, en Charente, d'un père ingénieur civil de l'armée et d'une mère employée d'inspection académique.

1977: Entre en seconde au Prytanée de La Flèche, dans la Sarthe.

1978: Premier chantier de fouilles, sous la direction de José Gomez de Soto.

1980: Baccalauréat série C. Entre à l'école de médecine des armées de Bordeaux.

1988: Doctorat en médecine à l'université Bordeaux-I. Devient médecin des armées.

1996: Intègre l'Institut de recherche criminelle de la gendarmerie nationale de Rosny-sous-Bois, en Seine-Saint-Denis.

1998: Doctorat en anthropologie à l'université Bordeaux-I.

2001: Habilité à diriger des recherches à l'université Bordeaux-I.

2004: Prend sa retraite de l'armée et entame sa carrière d'anthropologue bénévole. Il a publié à ce jour plus d'une centaine de travaux dans des revues françaises et internationales.

••• *des armées qui a suivi l'abandon du service militaire, en 1997, a fermé cette porte. C'est donc sans regrets que j'ai fini par quitter l'armée en 2005.* » Dès lors, Bruno Boulestin est libre de tout engagement et riche d'un remarquable bagage qui a fait de lui un expert renommé des rites mortuaires préhistoriques : dans sa thèse d'anthropologie, soutenue en 1998 sous la direction du paléoanthropologue Bernard Vandermeersch à l'université de Bordeaux, il a démontré, pour la première fois, l'existence de cannibalisme préhistorique à l'aide d'ossements découverts en Charente, dans la grotte des Perrats. Ensuite, en préparant son habilitation à diriger les recherches (HDR), obtenue en 2001, il a travaillé sur les « modifications osseuses d'origine anthropique ». Comprendre les découpes, fractures et toutes sortes de sévices infligés par des humains à leurs congénères.

> **“ Les amateurs de très haut vol sont une espèce quasiment disparue. Je n'en connais que deux en France, et Bruno est l'un d'eux ”**
>
> **José Gomez de Soto,** directeur de recherche émérite au CNRS

Fort de ses diplômes et d'une réputation déjà internationale, Bruno Boulestin possède alors le parfait profil pour entamer une nouvelle vie, académique cette fois. Dans un premier temps, il hésite, conscient qu'un statut de professeur d'université ou de chercheur lui donnerait la possibilité de peser de l'intérieur sur l'avenir de sa discipline. *« Pendant deux ans, j'ai fait des dossiers. Puis j'ai finalement décidé de rester indépendant, ce que me permettait ma retraite. J'ai été retenu pour passer une audition pour un poste de professeur à Lyon mais je n'y suis pas allé. De même, bien qu'on m'y ait engagé, j'ai renoncé à concourir pour un poste à Bordeaux. »* Une manière pour lui de rester en dehors d'un monde académique soumis à la dictature de l'évaluation. *« Beaucoup de recherches de fond ne se font plus car il n'est pas rentable pour un chercheur de passer six mois sur un article. Aujourd'hui, il faut publier vite, si possible en anglais et dans des revues à facteur d'impact le plus élevé possible. Moi, je peux me permettre, par exemple, de travailler plusieurs mois sur un article de synthèse de plusieurs dizaines de pages qui sera publié en français. » « Cela lui permet aussi de rester à l'écart des coteries d'un milieu académique un peu maffieux,* commente un archéologue du sérail. *Nous avons tendance à ménager nos pairs et à nous tenir par la barbichette. Bruno Boulestin est libre! »*

À l'université de Genève, l'archéologue Alain Gallay comprend aussi ce choix de l'indépendance. *« Depuis que j'ai pris ma retraite, je n'ai plus de paperasse, de réunions et de commissions et je peux enfin consacrer tout mon temps à mes recherches. Bruno Boulestin a pu le faire bien plus jeune! »* Les deux hommes se sont connus lors du colloque Actes funéraires et sociétés, organisé à Sens en 1998 par l'anthropologue Alain Testart [décédé en 2013, NDLR]. *« Nous n'avons jamais publié de résultats en commun, mais nous avons de nombreux échanges. Je suis impressionné par ses connaissances, son exigence et par sa double compétence en archéologie et anthropologie qui est si rare. Il est unique! »*

LA LIBERTÉ DE DIRE NON

Christian Jeunesse, professeur de préhistoire à l'université de Strasbourg et membre de l'Institut universitaire de France, est lui aussi impressionné par le travail de son collègue. *« J'avais contribué à son association à un projet de*

recherches à Herxheim, en Allemagne. En voyant des os récupérés par des chercheurs allemands, Bruno a immédiatement vu une ressemblance avec les indices de cannibalisme qu'il avait trouvés dans la grotte des Perrats (1). *Je suis admiratif de son travail scientifique, de son esprit critique très affûté, de son étonnante indépendance d'esprit et de son extrême rigueur. Bruno est l'un des animateurs clés de la seconde génération d'archéo-anthropologues, sur les pas d'Henri Duday.* » Quelque temps avant notre rencontre, Bruno Boulestin a passé une semaine au musée de la Préhistoire de Carnac, dans le Morbihan, dans le cadre d'un projet de la Maison des sciences de l'homme en Bretagne. « *Nous avons commencé à réétudier les documents disponibles sur les deux cimetières mésolithiques, des îles de Hoedic et Téviec, qui ont été étudiés dans les années 1920. Là, il s'agissait de travailler sur la sépulture conservée au musée de Carnac.* » Une mission qu'il a choisie, comme chaque fois, parce qu'elle répondait à ses critères. « *Je regarde d'abord l'intérêt et la cohérence scientifiques ; je m'assure ensuite que le projet a la garantie de pouvoir se faire, qu'il y a assez de moyens et la perspective d'une bonne coordination entre les personnes impliquées. Il m'arrive donc de refuser de participer à des projets pour lesquels on me sollicite, quel que soit leur niveau. Cela s'est par exemple passé récemment pour deux d'entre eux, proposés dans le cadre de l'Agence nationale de la recherche. C'est une liberté que m'offre mon statut hors circuit.* »

LE MYSTÈRE DES SEPT BRAS GAUCHES

Quand il accepte un projet, Bruno Boulestin n'en tire pas d'autre profit qu'intellectuel. « *On me défraie simplement de mes dépenses de mission. En fait, je pense que beaucoup de gens ne savent pas que je suis bénévole, ils me croient chercheur au CNRS.* » En décembre dernier, l'anthropologue a cosigné des travaux sur une étonnante sépulture, vieille de 5 500 à 6 000 ans, découverte en 2012 à Bergheim, près de Strasbourg, lors de fouilles préventives. L'une des soixante fosses circulaires du site contient en effet, entre autres, sept bras gauches appartenant à des adultes et à un adolescent (2). Un mystère qui avait conduit les responsables des fouilles à faire appel à leur collègue. « *La présence de ces membres est un vrai mystère,* concède Bruno Boulestin. *Nous avons longuement observé ces os et les traces de découpe, essayé d'imaginer les gestes d'amputation pour reconstituer la scène, et tenté d'interpréter cela à la lumière de ce que l'on sait de ces fosses circulaires, qui étaient courantes de l'Alsace jusqu'à l'Europe centrale.* » Ces bras pourraient-ils être la conséquence d'une amputation judiciaire ? « *C'est très difficile à dire. Ce que nous apprennent d'autres civilisations, c'est que les amputations judiciaires concernent généralement la main et non le bras, telles qu'elles se pratiquent encore dans certains pays aujourd'hui. On pense plutôt qu'il s'agit de trophées, peut-être après une bataille. Mais tant qu'on ne connaîtra qu'un exemple, cela restera un épiphénomène difficile à interpréter. Il faut savoir dire que l'on ne sait pas : personne ne pourra jamais expliquer pourquoi il s'agit de bras gauches.* »

Cet exemple résume la démarche de l'anthropologue : « *Ce qui m'intéresse, ce ne sont pas les descriptions. C'est ce que l'on peut en tirer sur ce qui animait les sociétés humaines. Comme elles ne connaissaient pas l'écriture, on a vite fait de se tromper dans nos interprétations qui reposent souvent sur ce qu'on croit avoir compris d'autres données archéologiques ou ethnologiques. C'est pour cela qu'il faut beaucoup de prudence et de rigueur. On ne saura jamais ce qu'était la religion au Néolithique. Mais les pratiques autour de la mort peuvent nous aider à répondre aux questions qu'on se pose tous sur l'organisation des sociétés anciennes et, plus largement, sur le passé de l'humanité. C'est pour cela qu'il est essentiel d'associer l'anthropologie sociale, telle que défendue par Alain Testart, à l'archéologie de la mort.* » Ce que Bruno Boulestin et Henri Duday ont appelé l'archéothanatologie.

« *Si vous voulez, je peux vous montrer un crâne qui m'a suivi toute ma vie, je ne saurais pas vous dire depuis quand je l'ai* », dit Bruno Boulestin. Il fouille une étagère et se retourne avec un large sourire qui vient éclairer un visage parfois austère, durci par sa courte barbe poivre et sel. « *Petit, je l'avais fait acheter par mes parents à la petite-fille du capitaine de* L'Isère, *le navire qui a transporté la statue de la Liberté à New York. Je sais juste qu'il l'avait rapporté d'une île lointaine, le reste est un mystère. Mais ne vous trompez pas, je n'ai pas de fascination morbide pour les restes humains. J'essaie simplement de les faire parler.* » ■

(1) B. Boulestin, C. Jeunesse et A. Zeeb-Lanz, « Cannibalisme de masse au Néolithique », *La Recherche n° 433, septembre 2009., p. 54.*
(2) F. Chenal *et al., Antiquity, 89,* 348, 2015.

Pour en savoir plus

■ **http://univ-bordeaux.academia.edu/BrunoBoulestin** La page de Bruno Boulestin sur Academia.
■ B. Boulestin, « Conservation du crâne et terminologie, pour en finir avec quelques mots de tête », *Bulletin et mémoires de la Société d'anthropologie de Paris, 27,* 1-2, 2015.
■ B. Boulestin et A.-S. Coupey, *Cannibalism in the Linear Pottery Culture : The Human Remains from Herxheim,* Ed. Archaeopress, 2015.
■ B. Boulestin et H. Duday, *Ethnologie et archéologie de la mort* (Colloque de Sens), Éditions du CTHS, 2005.

Le magazine des passionnés d'histoire

L'Histoire

L'Histoire

www.histoire.presse.fr

Japon

LES FEMMES DE RÉCONFORT, UN ESCLAVAGE D'ÉTAT

Guillaume LE CONQUÉRANT

Le destin d'un bâtard

- Hastings, il y a 950 ans
- Les vrais pouvoirs de la reine Mathilde
- Les Normands à la cour d'Angleterre

M 01842 - 424 - F: 6,40 € - RD

MENSUEL - ALL 8,20 € / BEL 7,40 € / ESP 7,40 € / GR7 7,40 € / ITA7,40 € / PORT-CONT 7,40 € / LUX 7,40 € / CH 12,40 FS / MAR 65DH / TUN 22 TND / DOM-A/E20 XPF / TOM-S 950 XPF / DOM-S7,40 € / CAN 10,50 $ CAN / USA 10,50 $ - ISSN 0822411

Télécharger dans l'App Store

DISPONIBLE SUR Google play

actuellement en kiosque et sur smartphone

▲ *Michel Eugène Chevreul (1786-1889)*

Le chimiste Michel Eugène Chevreul a revalorisé la couleur et l'art de la traiter en énonçant la loi qui régit la perception des teintes mises côte à côte. Il a ainsi influencé plusieurs générations de peintres soucieux de donner une assise scientifique à leurs travaux.

L'homme qui faisait vibrer les couleurs

Marie-Christine de La Souchère, agrégée de physique

Comment la science peut-elle être mise au service de l'art pictural? Une réponse sera apportée en 1827 par le chimiste français Michel Eugène Chevreul dont le travail autour des couleurs commence vingt ans plus tôt. À partir de 1807, alors qu'il travaille à l'extraction de colorants destinés à teindre les draps militaires, il publie une série de mémoires ayant trait aux matières colorantes végétales : indigo, pastel, tournesol, gaude et garance, bois de Campêche et bois de sappan. Chevreul isole plusieurs principes tinctoriaux, qui définissent le passage de la plante à la couleur, ce qui lui vaut d'être nommé, sous la Restauration, directeur des teintures de la manufacture royale des Gobelins (*). Dès son entrée en fonction, en septembre 1824, Chevreul essuie des plaintes relatives à la qualité et au rendu de certaines teintures sorties de l'atelier des Gobelins ; elles ne donnent pas sur la laine les couleurs escomptées. Chevreul réalise rapidement que, même si un défaut de stabilité chimique à la lumière explique certaines déficiences, les principes tinctoriaux eux-mêmes sont rarement en cause mais bien plutôt la manière dont l'œil voit les couleurs et saisit leurs contrastes. Quand certaines couleurs sont présentées sur des fonds différents ou côte à côte, et non pas isolément, leur apparence change. Cette idée se heurte aux conceptions newtoniennes selon lesquelles les couleurs existent en tant que telles, et que leur vision relève d'un phénomène physique et objectif de transmission de la lumière, indépendamment des conditions d'observation. Et pourtant des effets de contraste avaient déjà été relatés par le passé, par Aristote ou Léonard de Vinci. Ce dernier avait remarqué que la compagnie de certaines couleurs, comme le vert et le rouge, les embellissait réciproquement. Buffon, qui avait été l'un des premiers à relever systématiquement les perturbations affectant la vision des couleurs, avait donné à l'ensemble de ces phénomènes le nom de « couleurs accidentelles ». La dégénération des teintes résultait en effet, selon lui, d'une *« fatigue excessive ou d'un ébranlement de l'œil »*. Une explication à laquelle Chevreul ne croit guère car les couleurs lui semblent modifiées avant qu'il ait éprouvé la moindre fatigue. Le physicien Ampère, que Chevreul prend à témoin en lui montrant quelques effets de contraste et de contamination des couleurs, réplique : *« C'est bien, je les vois, mon cher ami, mais ces effets surprenants ne sont rien pour moi tant que vos observations ne seront pas résumées en une loi. »*

HARMONIE DES CONTRASTES

C'est donc à l'énoncé de cette loi que Chevreul va désormais travailler. En 1827, le chimiste est en mesure de conclure. Il énonce la Loi du contraste simultané, selon laquelle deux couleurs juxtaposées, regardées simultanément, perdent ce •••

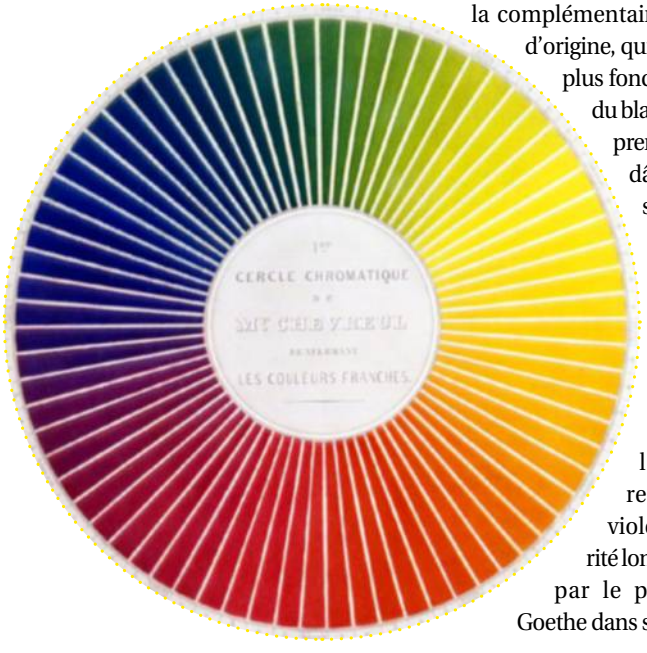
(*) La manufacture des Gobelins
Henri IV, Colbert et d'autres ont fait tour à tour de l'atelier de teinture créé au XVe siècle par Jehan Gobelin la Manufacture royale. Devenue nationale, elle dispose toujours d'une quinzaine de métiers à tisser.

MUSÉUM NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE, DIST. RMN-GRAND PALAIS / IMAGE DU MNHN, BIBLIOTHÈQUE CENTRALE

••• qu'elles ont d'analogue et paraissent différentes. À chaque couleur s'ajoute la complémentaire de l'autre, c'est-à-dire celle qui lui est la plus dissemblable. Ainsi, parmi les couleurs primaires, un bleu projettera un orangé sur les couleurs disposées à côté : le jaune paraîtra jaune-orangé et le rouge semblera rouge-orangé. De la même manière, si l'on juxtapose une touche de rouge et une touche de bleu, le bleu tendra vers le bleu-vert car s'y ajoutera le complémentaire du rouge, qui est le vert. Inversement, le rouge tendra vers l'orangé car s'y ajoutera de l'orangé, complémentaire du bleu.

Le blanc et le noir eux-mêmes éprouvent des modifications réciproques lorsqu'ils sont inscrits côte à côte : le blanc devient plus éclatant et le noir plus sombre. Et lorsqu'une couleur est juxtaposée avec du blanc, celui-ci se teinte légèrement de la complémentaire de la couleur d'origine, qui en retour paraît plus foncée. En associant du blanc et du rouge, le premier devient verdâtre tandis que le second s'assombrit. Le noir se teinte, pour sa part, de la complémentaire de la couleur à laquelle il est confronté. La lumière jaune rend les ombres violettes, particularité longuement décrite par le poète allemand Goethe dans son monumental *Traité des couleurs*, lequel est boudé par les newtoniens car il opère une distinction entre couleurs physiques et physiologiques. Quant à la couleur qui touche le noir, elle gagne en luminosité. L'éclat des vitraux des églises gothiques ne provient-il pas, en grande partie, des murailles sombres qui les environnent ?

Chevreul développe ses observations dans un volumineux ouvrage, paru en 1839 et intitulé *De la loi du contraste simultané des couleurs et de l'assortiment des objets colorés*. Dans l'optique d'une harmonie des contrastes, il prescrit le rapprochement de couleurs antagonistes *« pour produire un effet agréable »*. Placées côte à côte, celles-ci s'exaltent et se rehaussent mutuellement, chacune d'entre elles ajoutant à l'autre une teinte qui est déjà la sienne. À l'inverse, le mariage de couleurs non complémentaires crée une dissonance optique qui les fait paraître ternes et dénaturées. Plus les couleurs ont d'analogie, plus leur juxtaposition mutuelle risque de nuire à l'une d'elles, voire à toutes les deux. En jouant sur les assortiments de couleurs, il est ainsi possible de maîtriser la violence ou la douceur des coloris et de *« faire vibrer la lumière »* en éliminant les effets indésirables et discordants.



▼ *Chevreul a l'idée d'ordonner les couleurs de l'arc-en-ciel sur un « cercle chromatique ». Sur ce premier cercle, les teintes sont déclinées du rouge au violet, en 72 couleurs franches. Les couleurs complémentaires sont diamétralement opposées.*

DE L'ART À L'ANALYSE SCIENTIFIQUE

Aux jardiniers, Chevreul déconseille tel ou tel assortiment de fleurs. Réputées pour leur rouge vif, les capucines produisent sur l'œil un effet désagréable dès lors qu'elles avoisinent des pavots pourpres, dont la couleur vue isolément est relativement plaisante. Les capucines prennent une couleur orangé terne et les pavots une couleur lie-de-vin pareillement triste ! Fleurs rouges et roses ne montrent jamais tant d'avantages qu'entou-

L'ART DES COULEURS CHEZ LES IMPRESSIONNISTES

La plupart des peintres officiels ne tirent aucun profit des recherches de Chevreul. En revanche, Eugène Delacroix s'intéresse aux travaux du chimiste, dont il a acquis un carnet de notes. Chevreul va également conforter les impressionnistes dans leurs intuitions, eux qui aiment jouer avec les couleurs « qui font la paire » et semblent gagner en vivacité du fait de leur voisinage sur la toile. Dans *Impression, soleil levant*, la toile phare de Claude Monet, exécutée en 1872 et qui a donné son nom au mouvement impressionniste, le bleu et l'orangé s'exaltent l'un l'autre. Dans *Champ de tulipes en Hollande*, le vert et le rouge sont à l'honneur. Dans *Meules de foin à Giverny*, les ombres ne sont pas noires mais légèrement bleutées car teintées de la couleur complémentaire du Soleil. Monet n'est pas le seul à s'approprier avec succès les résultats de Chevreul. Pierre Auguste Renoir utilise l'harmonie issue des couleurs complémentaires dans *La Lecture*, *Sur la Terrasse* ou *Terrasses à Cagnes*. Alfred Sisley, lui aussi, déploie une série de contrastes dans *Gelée Blanche - Été de la Saint-Martin*. Chez Vincent Van Gogh, les oppositions jaune-violet ou rouge-vert sont tout aussi flagrantes dans *Terrasse du café le soir* ou *Le Café de nuit*.

BNF, PARIS

▲ *Présenté lors de la dernière exposition impressionniste de 1886, le tableau de Georges Seurat* Un dimanche après-midi à l'île de la Grande Jatte *est devenu le manifeste officiel du pointillisme. Il a été inspiré à l'artiste par les travaux de Chevreul concernant l'approche scientifique de la couleur.*

rées de verdure et de fleurs blanches. De même à la manufacture des Gobelins, le directeur de l'atelier des teintures déconseille d'assortir des étoffes d'un rouge éclatant avec du bois d'acajou. La teinte complémentaire verdâtre qu'elles développent fait disparaître la couleur rougeâtre qui donne son prix à l'acajou. Pour un assortiment du plus bel effet, Chevreul préconise des étoffes violettes ou bleues pour les bois jaunes et des étoffes vertes ou jaunes pour les bois rouges.

Sur sa lancée, le chimiste s'érige en arbitre de la mode : un chapeau noir à plumes ou à fleurs blanches, roses ou rouges, siéra aux blondes, un chapeau vert fera valoir des carnations blanches ou doucement rosées tandis qu'une brune risquant un chapeau bleu ne pourra se passer d'accessoires orangés ou jaunes. Madame Chevreul, pour sa part, a renoncé à porter autre chose que des toilettes grises… Non content de prodiguer des conseils pratiques, Chevreul veut quantifier les couleurs et mettre entre les mains des artisans des instruments de mesure rationnels et les outils de référence appropriés. À cet effet, il édite un catalogue complet des teintes anciennes, destiné au classement des 35 000 écheveaux de fibres des Gobelins, et un système de mesure des couleurs sous la forme de cercles chromatiques. Le cercle chromatique de Chevreul, qui ordonne les couleurs du rouge au violet comme au sein d'un arc-en-ciel, et dans lequel les complémentaires sont diamétralement opposées, se décline en soixante-douze couleurs franches. •••

Quantifier les couleurs permet à Chevreul d'offrir aux artisans des Gobelins des outils et des instruments de mesure rationnels

LUISA RICCIARINI/LEEMAGE

▲ La Femme portugaise *de Robert Delaunay. Le séjour du peintre sous le soleil de l'Espagne et du Portugal, entre 1914 et 1918, lui a permis de mettre en pratique l'enseignement de Chevreul sur les couleurs.*

••• Celles-ci peuvent être dégradées par des proportions croissantes de blanc, en vingt « tons affaiblis », qui marquent leur degré de pureté. En ajoutant à chacun d'eux entre une et dix parties de noir, on obtient des teintes rabattues, c'est-à-dire échelonnées en intensité. D'où, au total, 14 400 tons différents !

SYNTHÈSE ADDITIVE ET POINTILLISME

Parallèlement à la loi des contrastes, Chevreul énonce une autre loi, dite du « mélange des couleurs », selon laquelle l'œil fusionne en une nouvelle teinte deux petites taches de couleurs différentes vues à distance. Le principe n'est autre que celui de la synthèse additive des couleurs des pixels d'un écran moderne. Les teintes obtenues sont plus brillantes, plus lumineuses et plus pures que celles qui résultent d'un mélange de pigments sur une palette. Les peintres néo-impressionnistes, pointillistes ou divisionnistes, s'empressent d'exploiter cette idée pour mieux restituer les couleurs de la nature et éviter l'assombrissement et le vieillissement des teintes. Pour obtenir du vert, ils appliquent sur la toile une touche de jaune juxtaposée à une touche de bleu, à charge pour l'œil d'effectuer la synthèse. Georges Seurat, premier grand peintre pointilliste, a parcouru tous les traités de recherches optiques rédigés dans le courant du XIX[e] siècle. Il s'est plongé avec enthousiasme dans les écrits de Chevreul, qui l'ont persuadé de la nécessité d'une « *approche scientifique rigoureuse* » de l'art pictural. Seurat applique pour la première fois cette théorie dans *Une baignade à Asnières* en 1884. Pris séparément et vus de près, les détails et les couleurs n'ont que peu de sens et l'œuvre n'est pas lisible. La signification de la toile n'apparaît qu'avec du recul car il faut une distance suffisante pour que l'œil puisse opérer le mélange optique préconisé par Chevreul. Seurat et ses amis font connaître leurs œuvres lors de la dernière exposition impressionniste de 1886. *Un dimanche après-midi à l'île de la Grande Jatte*, présenté à cette occasion, devient le manifeste officiel du pointillisme.

Après la mort de Seurat, disparu prématurément, son ami et disciple Paul Signac reprend le flambeau et la tête du groupe néo-impressionniste. Signac se fait le porte-parole d'un impressionnisme scientifique, au grand dam de confrères prompts à s'insurger contre toute « *peinture mise en formule* ». Dans son livre, paru en 1899 et intitulé *D'Eugène Delacroix au Néo-impressionnisme*, Signac évoque sa rencontre avec Chevreul, aux Gobelins, et n'a pas de termes assez forts pour louer « *l'illustre savant* » qui l'a « *initié à la science de la couleur* ».

Une science de la couleur que ne renie pas le peintre abstrait Robert Delaunay. Après avoir réduit sa palette jusqu'au monochrome sous l'influence du cubisme, celui-ci réintroduit les couleurs à partir de 1907, en glissant dans ses œuvres des fragments de cercles chromatiques, voire des cercles tout entiers. *Prismes électriques*, *L'Équipe de Cardiff*, la série des *Fenêtres*, des *Rythmes*, des *Formes circulaires* et des *Disques*, illustrent cette tendance. Dans *Rythme, Joie de vivre*, le peintre, qui prône la symbiose entre création artistique et analyse scientifique, s'efforce de restituer le caractère ondulatoire de la lumière à partir des contrastes entre couleurs. Disposées côte à côte, des couleurs complémentaires créent une harmonie visuelle et libèrent un rythme lent. Des couleurs non complémentaires créent une dissonance optique qui va de pair avec un rythme plus nerveux. Avec son épouse Sonia, Delaunay sera à l'origine d'un nouveau courant pictural, baptisé simultanéisme. En hommage à Chevreul, l'homme qui « faisait vibrer les couleurs » ! ■

Pour en savoir plus

- Eugène Chevreul, *De la loi du contraste simultané des couleurs et de l'assortiment des objets colorés*, Hachette (Réédition, 2012).
- Johann Wolfgang Von Goethe, *Traité des couleurs*, Triades, 2000.
- Georges Roque, *Art et science de la couleur*, Gallimard, 2009.
- Dissertation sur les couleurs accidentelles - M. de Buffon - Académie royale des sciences - Année 1743.

FINE ART IMAGES/LEEMAGE

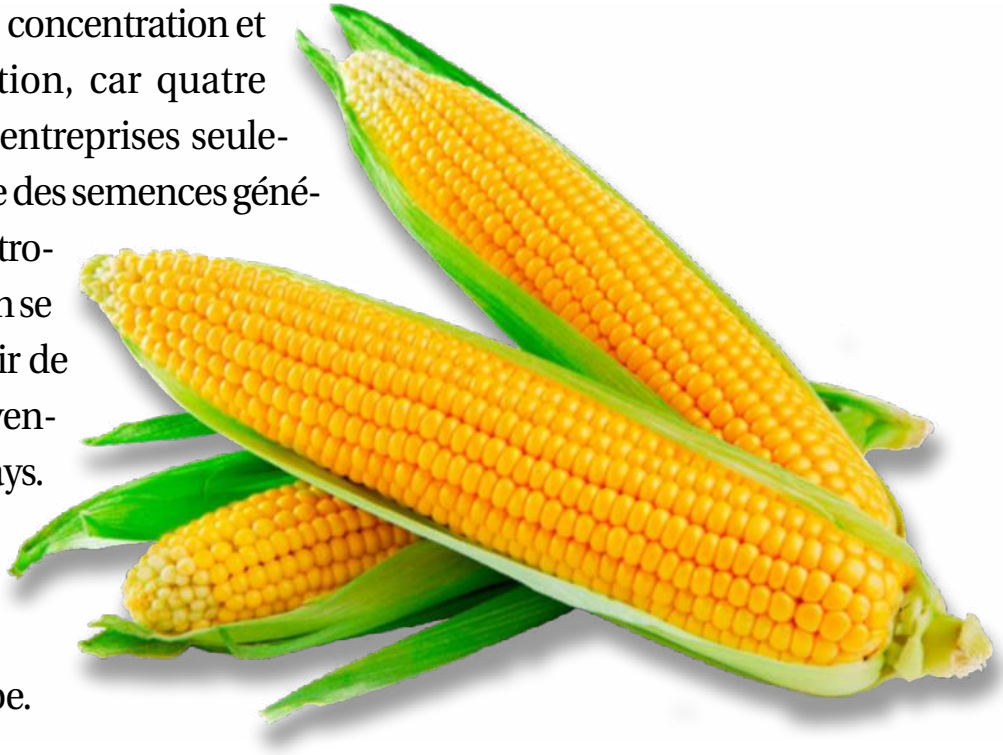
idées

Matière à penser P. 80
Entretien P. 86
L'œil de l'économiste P. 89

20 ans de cultures OGM

Qu'ont-elles changé ?

Les deux décennies de cultures OGM peuvent se résumer en deux mots : concentration et controverse. Concentration, car quatre plantes, cinq pays et six entreprises seulement dominent l'industrie des semences génétiquement modifiées. Controverse, parce que la question se pose d'une pénurie à venir de certaines semences conventionnelles dans certains pays. Et que l'autorisation de mise sur le marché des OGM suscite toujours autant de débats en Europe.



MAKS NARODENKO / SHUTTERSTOCK

Matière à penser

Un succès planétaire limité à quatre plantes

Les OGM ont-ils supplanté les cultures conventionnelles ? La situation est paradoxale : les plantes concernées sont peu nombreuses, mais sur certaines d'entre elles, leur emprise est quasi totale.

Cécile Klingler, journaliste

Vingt ans déjà ! Vingt ans qu'ont commencé, sur le continent américain, les premières grandes cultures commerciales de plantes génétiquement modifiées. Au printemps 1996, 1,7 million d'hectares de coton, de soja, de maïs et de colza transgéniques y étaient semés, principalement aux États-Unis, et dans une moindre mesure au Canada et en Argentine. L'échelle était modeste, eu égard à la superficie agricole de ces trois pays, et la résonance publique quasi nulle. Du moins outre-Atlantique. Il en alla tout autrement en novembre, lorsque les habituelles cargaisons de soja arrivèrent dans les ports européens. Car cette fois, une partie était transgénique, et Greenpeace s'employa à le faire savoir. « Alerte au soja fou ! » titra de son côté *Libération*, en allusion à la crise de la vache folle qui secouait alors le Vieux Continent. Vingt ans plus tard, les organismes génétiquement modifiés (OGM) sont-ils un succès ou un échec ? Alors que le Burkina Faso, seul pays d'Afrique de l'Ouest à avoir adopté ce type de cultures, vient d'annoncer son retrait, la réponse est plus que mitigée. Voici pourquoi.

Il faut le rappeler : en 1996, la transgénèse végétale, technique qui permet de conférer à des plantes, via le transfert d'un gène étranger, un caractère qu'elles ne possèdent pas naturellement, a déjà de longues années derrière elle. Treize ans si l'on se réfère à l'obtention des premiers végétaux exprimant un gène étranger : deux tabacs et un pétunia munis d'un gène de résistance à un antibiotique, la kanamycine. Il aura donc fallu, ensuite, une bonne dizaine d'années de travaux pour aboutir à la mise au point de variétés transgéniques commerciales, et à leur mise en culture.

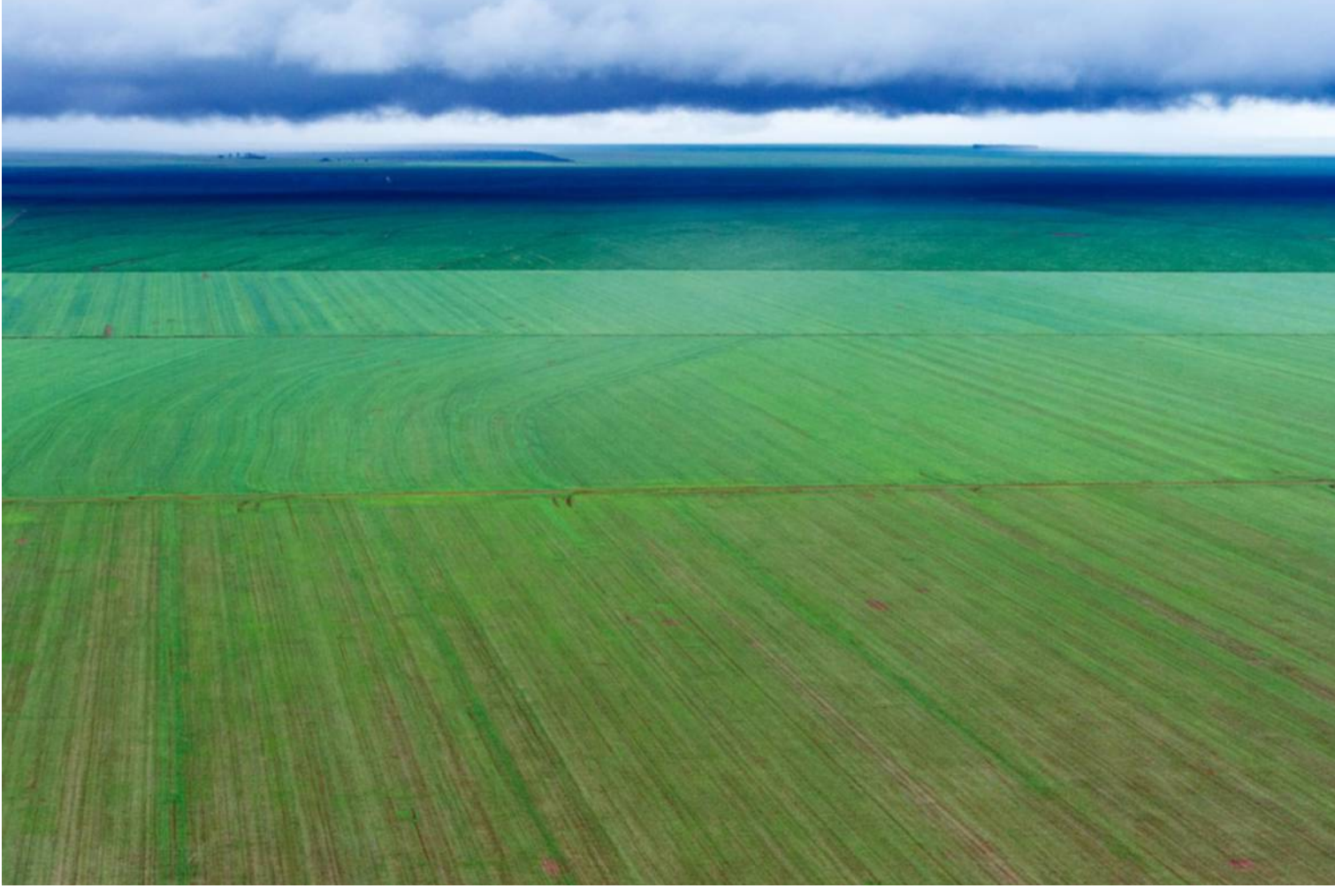
Deux tomates eurent cet honneur. Elles avaient été modifiées pour empêcher le ramollissement qui accompagne le mûrissement. L'une, nommée Flavr Savr et produite par la start-up californienne Calgene, était destinée à la vente comme fruit entier. Mais elle n'a finalement pas répondu aux attentes et fut un flop industriel. L'autre, issue d'une collaboration entre l'université de Nottingham, au Royaume-Uni, et l'entreprise Zeneca, était destinée à la fabrication de concentré de tomate. Distribué dans les supermarchés britanniques des enseignes Safeway et Sainsbury's au début de l'année 1996, avec la mention « made with genetically modified tomatoes », ce concentré reçut au début un excellent accueil des consommateurs. Mais la méfiance anti-OGM se développant, il disparut rapidement des rayons.

> **“ Le soja, le coton, le maïs et le colza transgéniques représentent aujourd'hui 99 % des 179,7 millions d'hectares de cultures OGM commerciales ”**

ALLIÉS DU ROUNDUP

Le moins qu'on puisse dire est que le soja, le coton, le maïs et le colza transgéniques ont connu un destin fort différent. Ils représentent aujourd'hui 99 % des 179,7 millions d'hectares de cultures OGM commerciales. Leur succès tient en grande partie aux caractéristiques des variétés transgéniques qui, à défaut de présenter un quelconque intérêt pour les consommateurs, en ont pour les agriculteurs : il s'agit de la capacité à supporter sans dommages un herbicide total, qui détruit les mauvaises herbes alentour, et/ou à résister à certains insectes ravageurs.

Dans le premier cas, la plupart des variétés OGM tolèrent le glyphosate, commercialisé par Monsanto sous le nom de Roundup (quelques autres, conçues par Bayer CropScience, sont tolérantes à l'herbicide



▲ *Le Brésil s'est converti aux OGM avec une rapidité fulgurante. En 2015, 90 % du soja cultivé provient de variétés transgéniques.*

YASUYOSHI CHIBA / AFP

total maison, le glufosinate). Cette propriété leur est conférée par un gène microbien codant une enzyme qui, contrairement à son homologue végétale, fonctionne en présence du glyphosate. Dans le second cas, la résistance à des insectes ravageurs, telles les chenilles de la pyrale du maïs ou le ver rose du cotonnier (*), est conférée par un gène codant des protéines insecticides, et provenant des bactéries *Bacillus thuringiensis*. D'où l'appellation de plantes « Bt ».

Soja, maïs, coton et colza représentent de très importants volumes d'échanges sur les marchés mondiaux. Sur les continents nord et sud-américain, gros producteurs de ces matières premières, le succès des variétés transgéniques a été fulgurant (Fig. 1). En 2015, elles représentaient plus de 90 % du soja cultivé aux États-Unis, au Brésil et en Argentine – alors même que le Brésil n'est entré dans la danse qu'en 2003 ! Même emprise ou presque, dans ces trois pays, pour le maïs génétiquement modifié. Ainsi que pour le coton chez les principaux producteurs que sont l'Inde, la Chine et les États-Unis.

(*) **Le ver rose du cotonnier** désigne la chenille du papillon *Pectinophora gossypiella*, qui endommage la capsule (le fruit) du cotonnier.

ÉCONOMIES ET SURCOÛTS

Étant donné la position dominante de ces pays sur les marchés mondiaux du soja et du coton, il n'est guère surprenant que 78 % du soja et 71 % du coton mondial soient aujourd'hui transgéniques (Fig. 2). En revanche, le maïs transgénique ne représente qu'un tiers du maïs mondial. Car les États-Unis ont beau être le premier producteur mondial de cette céréale, d'autres gros producteurs (la Chine, 2e producteur mondial, et l'Europe), n'en cultivent pas (la Chine) ou très peu (117 000 hectares en Europe, dont 108 000 en Espagne).

Les freins à l'adoption des OGM en Europe sont connus : une réglementation plus stricte que dans la plupart des autres pays et une forte contestation sociale. Inversement, comment expliquer l'adoption des OGM là où elle s'est produite ?

« *En effectuant une synthèse de la littérature socio-économique portant sur les 10 premières années de culture des OGM aux États-Unis, nous avons dressé un constat plutôt contre-intuitif* (1), explique Aline Fugeray-Scarbel, du laboratoire d'économie appliquée de Grenoble. *Nous partions du principe d'un avantage financier direct lié à la diminution des dépenses en herbicides et en insecticides.* » Le glyphosate est en effet moins coûteux que les herbicides sélectifs, et les plantes Bt diminuent fortement la nécessité de recourir aux insecticides. « *Mais cette diminution des dépenses en intrants, quoique bien réelle, est en moyenne annulée par le surcoût des semences transgéniques par rapport aux semences conventionnelles* », continue l'économiste.

Toujours présent, ce surcoût fut et demeure néanmoins très variable selon le lieu et l'année. Il dépend en effet du droit des •••

••• brevets dans chaque pays, de l'intérêt agronomique local des OGM, des traits transgéniques conférés ainsi que de certains paramètres internes aux entreprises. Ainsi le coût des semences des variétés tolérantes au glyphosate a-t-il augmenté à partir de 2000 : le brevet de cet herbicide étant tombé dans le domaine public en 2000, Monsanto, qui réalisait auparavant ses marges sur le Roundup, a augmenté le prix des semences pour compenser la moins-value de ce dernier.

Si l'adoption des OGM ne découle pas d'un avantage financier direct pour l'agriculteur, alors d'où vient-il ? D'un avantage d'une tout autre nature : le confort de travail. *« En matière de désherbage, le recours à des herbicides classiques nécessite une grande précision,* décrypte Aline Fugeray-Scarbel. *Pour une culture donnée, chacun des herbicides utilisés doit être appliqué lors d'une fenêtre temporelle qui lui est propre, et très limitée. »* Rien de tel avec le glyphosate : une ou deux applications dans les premiers temps de la culture, et c'est la tranquillité assurée… Ce qui procure un second avantage, du moins dans le contexte des exploitations nord-américaines : l'agriculteur a la possibilité d'occuper un deuxième emploi. On constate dès lors une hausse des revenus hors exploitation (2).

▲ *Le succès de ce concentré de tomates génétiquement modifiées, vendu en 1996 au Royaume-Uni, a été de courte durée.*

L'adoption des plantes Bt procure un confort analogue : puisque les plantes se défendent toutes seules contre la pyrale, la chrysomèle ou le ver rose du cotonnier, il n'est pas besoin de surveiller l'arrivée de ces ravageurs et leur stade de développement pour pulvériser les insecticides au moment approprié. Et même dans les zones où l'infestation n'est pas systématique chaque année, l'agriculteur ne perd pas au change : *« En recourant aux plantes Bt, il s'affranchit du risque et lisse son revenu. C'est loin d'être négligeable »,* souligne Aline Fugeray-Scarbel.

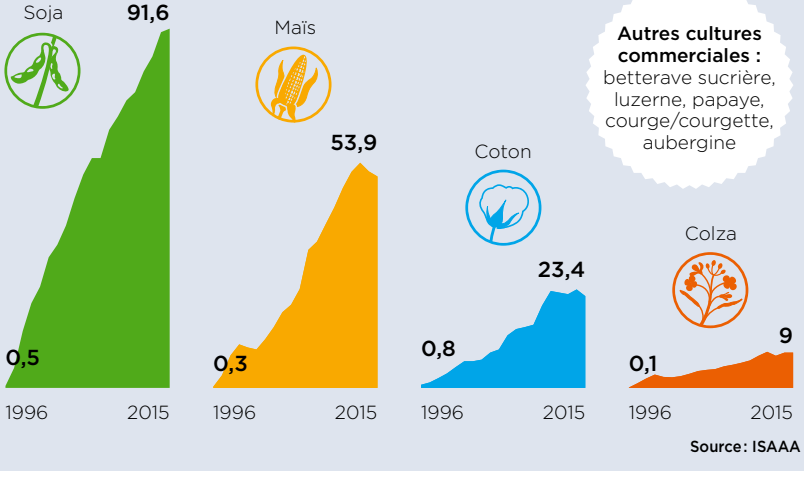
Reste que si les avantages en termes de facilité du travail se sont révélés décisifs durant dix ans, depuis quelques années, la roue tourne. Avec en particulier, l'émergence de mauvaises herbes résistantes au glyphosate. Rien que de très classique, et sans rapport avec la transgenèse : quand on épand de grandes quantités d'un herbicide quel qu'il soit, on sélectionne des résistances chez les plantes ciblées. *« C'est un problème depuis les années 1970,* insiste Ian Heap, chercheur à l'université d'État de l'Oregon, aux États-Unis, et responsable du site WeedScience, qui répertorie l'émergence des résistances aux herbicides dans le monde entier (3). *C'est d'ailleurs en partie parce qu'ils étaient confrontés au problème des mauvaises herbes devenues résistantes aux herbicides sélectifs que les agriculteurs ont adopté si rapidement les variétés tolérantes au glyphosate. »*

VAINCRE LES RÉSISTANCES

Face à ce problème, démultiplié par le fait que différentes mauvaises herbes sont désormais multirésistantes, *« le mieux dans l'immédiat serait de combiner toutes les méthodes de contrôle possibles,* ajoute Ian Heap : *utiliser les herbicides de façon beaucoup plus diversifiée et réfléchie ; réintroduire de temps en temps le labour ; et revenir à des rotations culturales plus variées qu'aujourd'hui. »* Les agrosemenciers, eux, poursuivent sur leur lancée. Ils proposent de nouvelles variétés d'OGM avec des « empilements » de gènes de différentes toxines Cry, la combinaison de gènes de tolérance à deux herbicides

Fig. 1 Les 4 principales cultures OGM dans le monde

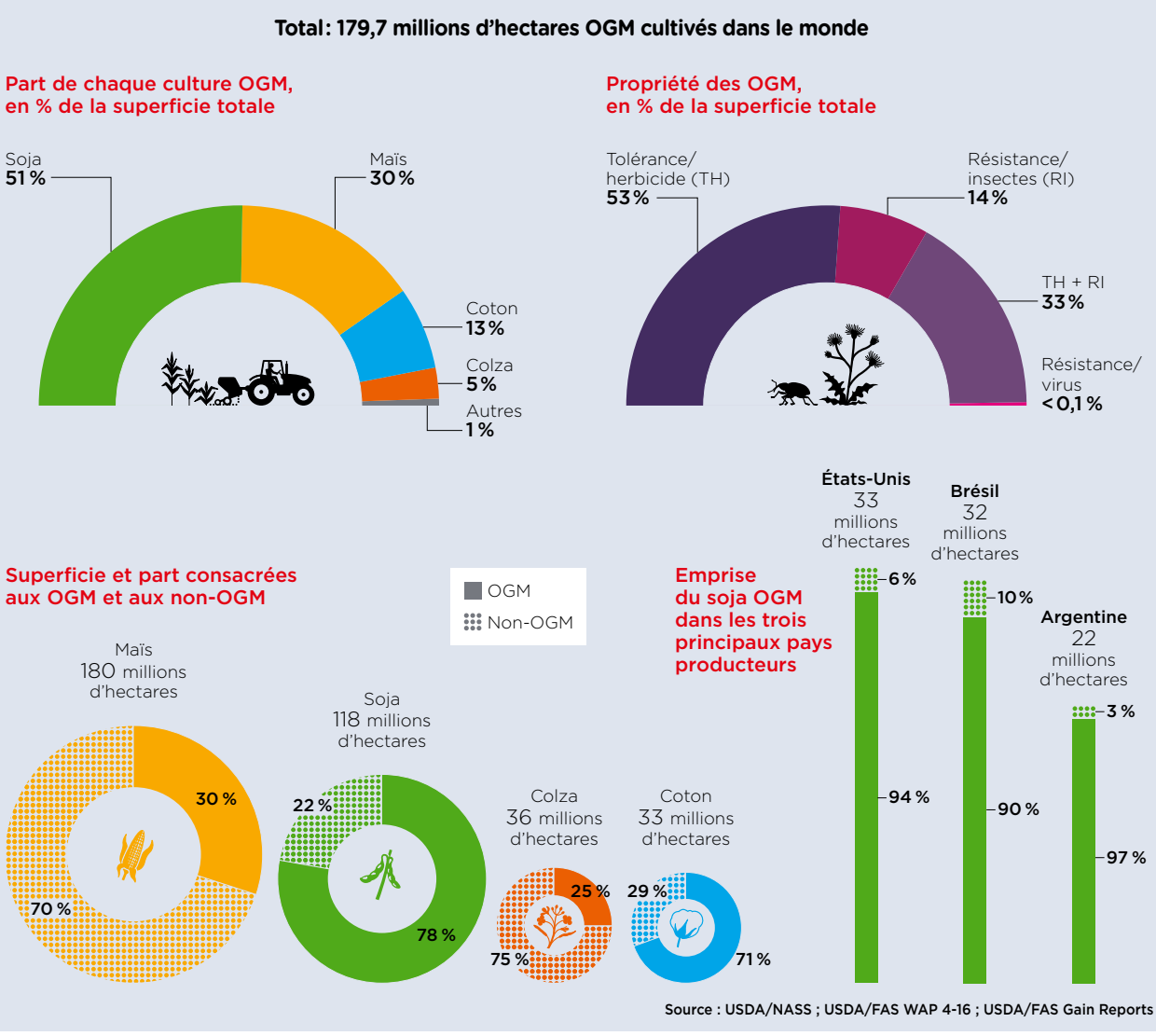
De 1,7 million d'hectares (Mha) de cultures OGM en 1996 à 177,9 Mha en 2015



Source : ISAAA

ROBERT BROOK / SCIENCE PHOTO LIBRARY / BIOSPHOTO

Fig. 2 La situation des OGM en 2015


Total : 179,7 millions d'hectares OGM cultivés dans le monde
Part de chaque culture OGM, en % de la superficie totale
Soja 51 %
Maïs 30 %
Coton 13 %
Colza 5 %
Autres 1 %
Propriété des OGM, en % de la superficie totale
Tolérance/ herbicide (TH) 53 %
Résistance/ insectes (RI) 14 %
TH + RI 33 %
Résistance/ virus < 0,1 %
Superficie et part consacrées aux OGM et aux non-OGM
OGM
Non-OGM
Maïs 180 millions d'hectares
30 %
70 %
Soja 118 millions d'hectares
22 %
78 %
Colza 36 millions d'hectares
25 %
75 %
Coton 33 millions d'hectares
29 %
71 %
Emprise du soja OGM dans les trois principaux pays producteurs
États-Unis 33 millions d'hectares
6 %
94 %
Brésil 32 millions d'hectares
10 %
90 %
Argentine 22 millions d'hectares
3 %
97 %
Source : USDA/NASS ; USDA/FAS WAP 4-16 ; USDA/FAS Gain Reports

(glyphosate et dicamba) au lieu d'un, ou un mix de tolérance au glyphosate et de résistance aux insectes. Les agriculteurs, quant à eux, recommencent à utiliser, en plus du glyphosate, des herbicides sélectifs plus contraignants en termes d'usage.

Le facteur « tranquillité » qui a conduit à l'adoption des cultures tolérantes au glyphosate est donc en passe de disparaître. Qu'en est-il des cultures Bt qui, contrairement aux autres OGM, avaient été accompagnées d'une stratégie culturale afin de limiter l'émergence prévisible de résistances chez les ravageurs cibles ? *« On a répertorié différentes résistances dans le monde, par exemple chez la chrysomèle du maïs aux États-Unis,* indique Denis Bourguet, du Centre de biologie pour la gestion des populations, à Montpellier. *En revanche, aucune résistance n'a été détectée au champ pour la pyrale du maïs, le ravageur ciblé par les premières cultures Bt. De plus, deux études démontrent que, aux États-Unis, les populations de pyrale du maïs et de ver rose du cotonnier ont significativement diminué suite à la mise en place des maïs et des cotonniers Bt. »*

Mais la nature a horreur du vide : partout où le coton Bt a été adopté à très large échelle, aux États-Unis, en Chine et en •••

INFOGRAPHIES : HERVÉ BOUILLY

Vers une pénurie de semences conventionnelles ?

Étant donné le très fort taux d'adoption des semences transgéniques dans certains pays, est-il encore possible d'y trouver des semences conventionnelles de bonne qualité ? Concernant le coton, selon une enquête réalisée en 2014, sur les 90 réponses à un questionnaire envoyé à 900 parties prenantes (sélectionneurs, agriculteurs, distributeurs, ONG), globalement, 35% trouvent difficile de se procurer des semences conventionnelles – 60 % dans les pays où le coton transgénique est très cultivé (1). Pour le soja, une analyse parue en 2010 indique qu'aux États-Unis, le nombre de fournisseurs de semences conventionnelles de bonne qualité diminue, et que les universités publiques jouent désormais un rôle clé dans l'amélioration variétale de ce type de semences. Même constat au Brésil où c'est l'Institut national de recherche agricole, l'Embrapa, qui veille à maintenir une offre de qualité, dans le cadre du programme *Soja Livre* («Soja libre») (2). Concernant le maïs, il semble que la diversité de l'offre en semences conventionnelles ait diminué aux États-Unis, mais que les semenciers continuent à assurer un travail d'amélioration variétale (3).

(1) http://tinyurl.com/non-GM-cotton-seeds

(2) http://tinyurl.com/non-GM-soybean-seeds-USA ; http://tinyurl.com/non-GM-soybean-seeds-Brazil

(3) G. Shi *et al., Am. J. Agr. Econ., 95,* 739, 2013.

••• Inde, on observe un changement de ravageurs. *« Les punaises et les pucerons, des insectes piqueurs-suceurs qui étaient des ravageurs secondaires, sont devenus prépondérants,* explique Michel Fok, agro-économiste au Centre de coopération international en recherche agronomique pour le développement (Cirad). *Aux États-Unis, cela a entraîné, ces dernières années, un recours accru aux insecticides dans l'ensemble des États cotonniers. Tandis qu'en Chine, les paysans se sont trouvés démunis, car ces ravageurs y avaient fait l'objet de moins de recherche. Depuis 2006-2007, les enquêtes que nous menons dans ce pays montrent un changement très net de la perception des agriculteurs. Ils sont encore majoritaires à considérer que le coton Bt est efficace par rapport à ses ravageurs cibles. Mais quasiment plus aucun ne le considère rentable. »*

Autre cas de figure, enfin, au Burkina Faso, où l'Association interprofessionnelle du coton du Burkina, qui regroupe les trois sociétés cotonnières du pays, *« a décidé d'aller vers le 100 % conventionnel »,* a déclaré début avril Wilfried Yaméogo, tout récent directeur de la Sofitex, la principale société cotonnière du Burkina. *« L'impact financier du coton Bt était positif pour les paysans, mais négatifs pour les sociétés cotonnières. Ce coton transgénique présente en effet une fibre plus courte que celle qui conférait au coton burkinabé sa valeur sur les marchés mondiaux »,* résume Michel Fok.

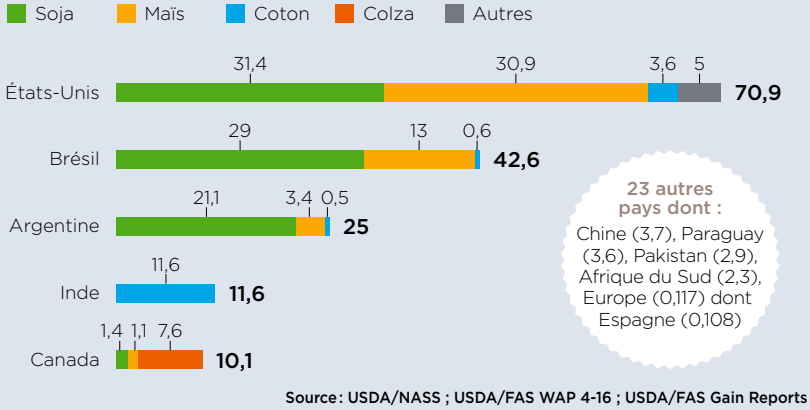
Pour cette première génération d'OGM à vocation agronomique, à des effets de court terme plutôt positifs ont succédé des effets de moyen terme négatifs. Mais qu'en est-il des promesses de « nouveaux OGM » ayant des caractéristiques plus intéressantes, comme la tolérance à la sécheresse ou un enrichissement nutritionnel ?

OGM DE NOUVELLE GÉNÉRATION

Si plusieurs essais sont en cours, rares sont les variétés ayant franchi le stade de la mise sur le marché – la principale est un maïs tolérant au stress hydrique conçu pour le marché américain, commercialisé aux États-Unis en 2013 et cultivé sur 810000 hectares en 2015. Le riz doré (Golden Rice), enrichi en un précurseur de la vitamine A, se heurte depuis des années à diverses oppositions et est encore loin d'être commercialisé. De fait, le changement le plus marquant qui se dessine concerne plutôt la diversification des acteurs, avec un développement des recherches en Inde, en Chine, au Brésil et en Afrique, comme le rapporte une récente étude prospective du Centre commun de recherche de la Commission européenne (4). Ces structures, par exemple la Fondation africaine pour la technologie agricole, pourraient aboutir à une diversifi-

Fig. 3 Les 5 principaux producteurs

Superficie des cultures OGM en 2015, en millions d'hectares



Source : USDA/NASS ; USDA/FAS WAP 4-16 ; USDA/FAS Gain Reports

INFOGRAPHIES : HERVÉ BOUILLY

cation des espèces concernées par la transgénèse, essentiellement à destination du marché intérieur des pays concernés.

Mais c'est surtout hors du champ de la transgenèse classique que cette diversification des acteurs et des variétés devrait être la plus importante. Avez-vous entendu parler des pommes Arctic, modifiées pour ne pas brunir une fois coupées ou épluchées? Ou des variétés de pommes de terre Innate, qui combinent absence de brunissement et faible production d'acrylamide (molécule carcinogène) lors d'une cuisson à haute température? Produites respectivement par l'entreprise canadienne Okanagan et la compagnie américaine J.R. Simplot, l'une et l'autre ont récemment été autorisées aux États-Unis, tant à la culture qu'à la consommation. Mais les gènes qui y ont été introduits ne sont pas des gènes « étrangers ». Ce sont des gènes de pomme pour l'une, de pomme de terre pour l'autre. Cette approche s'appelle la cisgenèse. S'agit-il d'organismes génétiquement modifiés? Sans aucun doute. Relèvent-ils des actuelles réglementations sur les OGM? Rien n'est moins sûr. De fait, face à toutes les méthodes de modification du génome en cours de développement depuis quelques années, et qui n'existaient pas lorsque les règles d'évaluation des OGM ont été établies, les instances réglementaires du monde entier s'interrogent.

Doit-on appliquer la réglementation OGM à toutes les variétés mises au point via ces méthodes? À une partie d'entre elles? Systématiquement ou au cas par cas? En France, le Haut Conseil des biotechnologies rendra son avis sur la question à la fin de l'été. Sa présidente, Christine Noiville, l'affirme: « *Nous faisons en sorte que les discussions ne tournent pas uniquement autour des impacts environnementaux et sanitaires, comme cela a été le cas il y a vingt ans pour les OGM. Car les questions en jeu incluent également les modèles agricoles, et les droits de propriété industrielle sur les ressources génétiques.* » ■

(1) Séphane Lemarié et Aline Fugeray-Scarbel (coord.), *Impacts des OGM sur les exploitations agricoles*, Éditions la Documentation Française, 2014.

(2) J. Fernandez-Cornejo *et al.*, *Genetically Engineered Crops in the United States*, USDA-ERS Economic Research Report n° 162, 2014.

(3) http://weedscience.org

(4) C. Parisi *et al.*, *Nat. Biotech., 34,* 31, 2016.

Pour en savoir plus

■ Dossier « OGM, vérités et mensonges », *La Recherche*, n° 470, décembre 2012, p. 38.

En vente actuellement
www.magazine-litteraire.com

Télécharger dans l'App Store

DISPONIBLE SUR Google play

Entretien
avec David Demortain

« Les éléments scientifiques resteront un argument solide »

Chaque État de l'Union européenne peut maintenant interdire la culture des OGM sur son territoire, de manière individuelle et sans s'appuyer sur des évaluations scientifiques. La fin du blocage ?

Propos recueillis par Vincent Glavieux

La Recherche **Dix-neuf pays de l'Union européenne ont récemment demandé l'interdiction de la mise en culture des OGM sur leur territoire. Pouvez-vous nous en dire plus ?**

David Demortain Parmi ces pays, on trouve la France, l'Allemagne, l'Autriche, l'Italie et le Danemark. Ces décisions font suite à la promulgation, en avril 2015, d'une nouvelle directive européenne sur le sujet (1). Ce texte est issu d'un processus long, commencé en 2010 – un temps qui n'est pas inhabituel pour un sujet controversé comme celui-là. Mais, depuis son entrée en vigueur, les choses avancent rapidement. Dans l'Hexagone, la nouvelle législation a d'ailleurs fait l'objet d'une procédure accélérée au Parlement, et a été promulguée au *Journal officiel* au début du mois de décembre 2015 (2).

Que dit cette nouvelle directive ?

Elle élargit les possibilités, pour les États membres de l'Union européenne, de restreindre ou d'interdire la culture d'OGM sur leur territoire. Auparavant, le processus était communautaire : toute autorisation ou interdiction était soumise à un vote à la majorité qualifiée (*) ; les États ne pouvaient refuser la culture d'OGM que dans le cadre de mesures d'urgence ou de clauses de sauvegarde, en invoquant des risques graves, qui mettent en danger de manière manifeste la santé publique ou l'environnement ; ces motifs devaient être étayés par des preuves scientifiques. Désormais, les États membres ont la possibilité, sous la houlette de la Commission européenne, de négocier avec les industriels afin que ces derniers ne commercialisent pas les OGM sur leur territoire. Les États peuvent également faire jouer une clause de *opt-out*, et interdire les plantes transgéniques en se fondant sur des motifs socio-économiques, d'aménagement du territoire, d'affectation des sols ou encore de maintien de l'ordre public.

(*) **Le vote à la majorité qualifiée,** employé par le Conseil de l'Union européenne pour la plupart de ses décisions, consiste à pondérer le vote de chaque pays selon une valeur fixe, relative à la taille de sa population.

> **“ En autorisant le refus des OGM, la Commission européenne espère faciliter les autorisations de semences transgéniques au sein de l'Union ”**

Quelles sont les implications directes de cette nouvelle directive ?

Tout d'abord, elle redonne en partie le processus de décision aux pays : ceux qui le souhaitent pourront bannir les OGM de leur territoire, sans que ce refus empêche les États membres qui y sont favorables d'accepter leur mise en culture sur leur sol. Ce problème était récurrent jusqu'à présent, et la Commission européenne espère ainsi faciliter les autorisations de semences transgéniques au sein de l'Union. Sur ce point, notons qu'il reste une méfiance concernant les conséquences de cette directive à plus long terme, du fait qu'elle contribue à isoler les États qui refusent les OGM sur leur territoire. Par ailleurs, en permettant aux États hostiles à ces derniers de justifier leur refus sur d'autres bases que des arguments scientifiques, elle espère dépasser les problèmes liés à la stratégie réglementaire européenne d'évaluation des risques des OGM, conduits par l'Autorité européenne de sécurité des aliments (plus connue sous son acronyme anglais Efsa). Car cette stratégie ne convainc pas tout le monde, loin de là.

En quoi consiste-t-elle ?

Pour décider d'autoriser ou d'interdire un OGM, la Commission européenne se fonde sur une évaluation des risques (pour la santé publique, l'environnement) réalisée

DR

PARCOURS

DAVID DEMORTAIN est sociologue et chercheur en sciences politiques, chargé de recherche à l'Institut national de la recherche agronomique. Ses travaux portent sur les rapports entre savoirs et action publique, notamment dans la régulation sanitaire et environnementale (sécurité alimentaire, contrôle des médicaments et des produits chimiques…). Il traite de ce thème sous différents angles : le rôle des experts dans le développement de normes sanitaires internationales, la construction des sciences réglementaires comme la toxicologie, ou la diffusion des outils d'évaluation des risques.

par l'Efsa. Cette évaluation repose sur un faisceau de données scientifiques. Celles-ci concernent la fonction des gènes transférés à la plante pour lui faire exprimer un caractère choisi (les transgènes), la composition chimique, la toxicité, l'allergénicité, la valeur nutritionnelle de l'OGM, etc. Afin d'obtenir ces informations, des lignes directrices – c'est le terme admis – décrivent le type de tests que l'on peut employer. Ces lignes directrices sont établies par les comités scientifiques de l'Efsa. Au début des années 2000, on a introduit dans cette stratégie l'approche comparative, qui consistait à dire : on ne pratique pas de tests poussés si une plante génétiquement modifiée est similaire dans sa composition à la plante conventionnelle, non modifiée, et si cette dernière ne soulève pas de problèmes de toxicité, d'allergénicité, etc. Puis, à partir de 2005 environ, industriels et évaluateurs ont commencé à prendre en compte plus régulièrement les tests d'aliments entiers à 90 jours sur les rats de laboratoire, ce que l'Efsa et la Commission européenne ont ensuite entériné.

Pourquoi cette procédure d'évaluation prête-t-elle à controverse ?

Le premier élément concerne les méthodologies utilisées : leur pertinence a constamment été contestée. C'est par exemple ce qui s'est produit autour des tests sur les animaux. Trois positions s'opposaient. Selon la première, les modèles animaux ne sont pas suffisamment prédictifs de ce qui se passe chez l'homme : d'autres données sont donc nécessaires, en particulier les analyses sur l'allergénicité et l'immunotoxicité des OGM. La deuxième position défend l'utilité de l'étude animale et tente d'améliorer sa réalisation, en discutant du nombre de rats, de puissance statistique et surtout de la qualité d'interprétation biologique des résultats biochimiques mesurés. •••

« Les tests mis en place au fil du temps n'ont jamais été en mesure de faire la preuve définitive de l'innocuité ou des effets bénéfiques des OGM »

••• Enfin, la troisième position considère que la stratégie dans son ensemble est insuffisante : il faudrait mobiliser davantage les données de surveillance des champs et l'épidémiologie, par exemple (3).

Quels sont les autres éléments de la controverse ?

Certains estiment qu'on n'a pas testé l'alimentation à base d'OGM sur des périodes assez longues, et qu'il reste un ensemble de méthodologies inexplorées. Le dernier élément est lié aux résultats des études. En effet, les tests mis en place au fil du temps n'ont jamais été en mesure de faire la preuve définitive de l'innocuité ou, au contraire, des effets bénéfiques des OGM. Les résultats de chaque nouvelle étude ont ainsi donné lieu à des interprétations contradictoires, selon que les commentateurs pensent que les tests surestiment ou sous-estiment systématiquement les risques, ou n'analysent pas ce qu'il faudrait.

Pour résumer, vous voulez dire que ces tests scientifiques, censés empêcher ou clore les controverses sur les risques des OGM, sont devenus eux-mêmes l'objet de controverses ?

Exactement. C'est parce que les tests ont été durablement mobilisés comme ressource pour participer à la controverse sur la mise en culture des OGM qu'ils sont moins opérants aujourd'hui pour la clore. Le point d'orgue de ce phénomène a été atteint au moment du débat sur l'étude de l'équipe de Gilles-Éric Séralini, de l'université de Caen. M. Séralini, comme certaines associations environnementales dotées de leur propre expertise scientifique (Greenpeace Europe, France Nature Environnement, etc.), a décidé de lutter contre les OGM, en observant les limites de l'évaluation des demandes d'autorisation des industriels au sein de la Commission du génie biomoléculaire (aujourd'hui le Haut Conseil des biotechnologies). Il a noté que l'étude la plus poussée et la plus proche des conditions d'exposition de l'homme aux OGM, l'étude sur rats à 90 jours avec OGM entier, était fréquemment l'objet de manipulations de la part des industriels la présentant, et non systématiquement exploitée par les évaluateurs. Son équipe et lui ont ainsi plusieurs fois tenté de démontrer que les études sur animaux révélaient bien de possibles problèmes sanitaires, problèmes qui devenaient même « alarmants » en étendant la durée du protocole à deux ans [ce travail publié en 2012 a été rétracté par l'éditeur en 2013 : il a finalement jugé les résultats insuffisamment concluants, NDLR] (4).

Selon vous, la nouvelle directive va-t-elle permettre de dépasser cette controverse sur l'évaluation des risques des OGM ?

Elle a été conçue à cette fin, mais je crains que non. D'après moi, les États membres vont quand même continuer à chercher des éléments scientifiques toujours plus fermes, toujours plus robustes, pour protéger leur décision d'interdiction. Pourquoi ? Ils y ont tout intérêt, parce que les motifs scientifiques et sanitaires restent une base plus solide que les arguments socio-économiques, de défense d'une politique environnementale ou agricole spécifiques, dans le cas où des industriels attaqueraient le bien-fondé de leurs décisions d'interdiction devant la justice.

Dernièrement, de « nouveaux OGM » ont émergé, issus d'une manipulation du génome de la plante sans introduction d'un gène étranger. Ces produits ne sont pas au sens légal des OGM. Faut-il craindre qu'ils échappent à la législation ?

Depuis les années 1990, en Europe, chaque fois que de nouveaux produits sont arrivés, la dynamique a été la même : soit on a estimé que leur étude ne justifiait pas de procédure particulière et on a adapté les cadres réglementaires existants afin qu'ils s'appliquent à ces nouveaux produits, soit on a jugé qu'il s'agissait d'une innovation radicale, et on a donc créé des cadres réglementaires spécifiques. Étant donné le précédent des OGM en Europe, on peut supposer que nous suivrons cette dynamique encore une fois. Il y aura sûrement, a minima, une législation imposant d'identifier ces nouveaux OGM. En revanche, la création d'une législation plus contraignante permettant de contrôler la mise sur le marché de ces produits dépendra du débat que ces produits susciteront. ■

DATES CLÉS

2001 Adoption de la directive 2001/18, qui fixe les règles communautaires relatives à la dissémination volontaire d'OGM dans l'environnement.

2002 Création de l'Autorité européenne de sécurité des aliments (Efsa), à la suite d'une série de crises alimentaires.

2008 Création du Haut Conseil des biotechnologies, qui remplace la Commission du génie biomoléculaire.

AVRIL 2015 Entrée en vigueur de la directive 2015/412, qui donne la possibilité aux États membres de restreindre ou d'interdire la culture d'OGM sur leur territoire.

DÉCEMBRE 2015 La directive 2015/412 est transcrite dans le droit français.

(1) **http://tinyurl.com/directive2015-412**
Directive 2015/412, 2015.

(2) **http://tinyurl.com/loi2015-1567**
Loi 2015-1567, 2015.

(3) D. Demortain, *Hermès, La Revue, 3,* 122, 2015.

(4) G.-E. Séralini *et al., Food Chem. Toxicol., 50,* 4221, 2012 (rétracté) ; G.-E. Séralini *et al., Env. Sci. Eur., doi: 10.1186/s12302-014-0014-5, 2014 (republié).*

L'œil de l'économiste

Un marché complètement modifié

L'introduction des organismes génétiquement modifiés s'est accompagnée d'une concentration de l'offre de semences et de pesticides, aujourd'hui dans les mains de quelques multinationales.

Aline Fugeray-Scarbel, ingénieur en agriculture, et **Stéphane Lemarié,** économiste

En décembre 2015, les entreprises américaines Dow Chemical et DuPont, deux multinationales de la chimie très présentes dans l'agriculture, annonçaient leur fusion. Au même moment, un autre géant américain, Monsanto, tentait d'acquérir son concurrent Syngenta, qui a finalement préféré l'offre de la firme chinoise ChemChina. Ces différents acteurs font aujourd'hui partie des leaders dans l'offre de semences et de pesticides aux agriculteurs. La chute des cours agricoles a induit une baisse significative de leur activité et explique en bonne partie ces regroupements.

Ces événements constituent une nouvelle étape dans la restructuration du monde de la fourniture agricole qui se déroule depuis plus de vingt ans. L'introduction des OGM a été l'un des facteurs clés dans cette évolution. Elle a transformé l'offre de semences aux agriculteurs, et s'est accompagnée d'une restructuration progressive du secteur de l'agrofourniture, avec des conséquences économiques.

▲ *Dans ce laboratoire de recherche de Monsanto, en Caroline du Nord, les semences de maïs et de soja sont testées afin de sélectionner les plus productives et les moins gourmandes en eau.*

GEORGE STEINMETZ / COSMOS

CARACTÈRES BREVETÉS

Une semence OGM est une semence développée par sélection conventionnelle, dans laquelle sont introduits un ou plusieurs caractères (par exemple, la résistance aux insectes) d'une autre espèce – par une technique qu'on appelle la transgénèse. Ces caractères OGM sont protégés par un ensemble de brevets : leur détenteur possède ainsi la capacité d'en interdire tout usage par un concurrent ou un agriculteur qui n'aurait pas signé un accord de licence avec lui.

La possibilité de breveter ainsi une portion du génome a eu plusieurs conséquences. La première concerne l'accès des agriculteurs aux différents caractères OGM. Une semence OGM étant la combinaison d'une semence conventionnelle et de certains caractères OGM protégés par brevet, on pourrait se demander si les agriculteurs peuvent obtenir les caractères OGM chez les semenciers de leur choix. Les inquiétudes sur ce point sont modérées : les détenteurs de caractères OGM, et notamment le leader du domaine, Monsanto, ont pratiqué des licences non exclusives ; tous les semenciers ont ainsi pu intégrer des caractères OGM de concurrents dans leur offre de semences. Pour les cultures comme le maïs ou le coton, il est cependant arrivé que certains caractères ne soient pas disponibles seuls, mais uniquement combinés avec d'autres : les agriculteurs ont ainsi été obligés d'acheter une variété présentant plusieurs caractères OGM combinés, alors que leur intérêt ne portait que sur un de ces caractères, et ce pour un coût plus élevé (1). Enfin, dans certaines zones comme l'Amérique du •••

••• Nord, les OGM ont été diffusés très largement, au point d'entraîner l'indisponibilité de certaines semences conventionnelles, comme le soja.

La seconde conséquence concerne l'usage de semences de ferme. Lorsque les semences sont protégées par un certificat d'obtention végétale, droit de propriété intellectuelle concédé au semencier ayant développé une nouvelle variété, le « privilège du fermier » autorise les agriculteurs à réutiliser une partie de leur récolte issue de cette variété protégée, afin de la semer à nouveau l'année suivante. Or la protection des caractères OGM par brevet a amené certains de leurs détenteurs – Monsanto, entre autres – à imposer aux agriculteurs la signature d'un engagement selon lequel ils ne réutiliseraient pas leurs semences (2). Cette évolution concerne uniquement les espèces où l'agriculteur avait intérêt à faire sa propre semence, comme le soja, dont les semences ne sont pas hybrides et faciles à reproduire.

Par ailleurs, l'évolution de l'offre de semences OGM aux agriculteurs, telle que nous venons de la décrire, s'est accompagnée d'une évolution de la structure de l'industrie. D'une manière générale, on a vu progressivement apparaître, par le jeu des fusions et des acquisitions, des firmes très concentrées, intégrant différentes activités, et focalisées sur le secteur agricole. Ainsi, en 2009, les six premières entreprises au niveau mondial détenaient à elles seules deux tiers du marché mondial des semences, caractères OGM et pesticides : 27 % pour Monsanto, 18 % pour DuPont, 9 % pour Syngenta, 5 % pour Limagrain, 4 % pour KWS et 3 % pour Bayer. De plus, quatre d'entre elles (Syngenta, Bayer, Monsanto et DuPont) font partie des six leaders mondiaux en agrochimie, et concentrent là encore plus des deux tiers du chiffre d'affaires (3).

Ce phénomène de concentration a aussi affecté les relations entre les fournisseurs de caractères OGM et les entreprises de semences qui intègrent ce caractère dans leurs variétés. Compte tenu de la protection des caractères OGM par brevet, ces deux secteurs auraient pu rester séparés. On a observé au contraire un mouvement important d'intégration verticale, puisque les principaux leaders dans les biotechnologies agricoles ont massivement investi pour racheter les semenciers leaders sur les cultures OGM : Monsanto a par exemple pris le contrôle de Dekalb et Asgrow, et DuPont celui de Pioneer HiBred.

Cette intégration verticale a renforcé le pouvoir de négociation des entreprises de biotechnologie sur les contrats de licences sur les caractères OGM. En effet, en commercialisant elles-mêmes des semences OGM, ces entreprises placent dans des positions difficiles leurs concurrents semenciers qui ne développent pas eux-mêmes des semences OGM.

CONCURRENCE LIMITÉE

Enfin, l'offre de produits phytosanitaires a elle aussi subi les effets de cette tendance à la concentration. Le phénomène était prévisible : les caractères OGM utilisés jusque-là présentaient pour l'essentiel des fonctions de protection des plantes (résistance aux insectes et tolérance à un herbicide total, capable de détruire l'ensemble des plantes sur lesquelles il est appliqué).

Il était donc attendu que leur diffusion perturbe fortement le marché des pesticides. De fait, cela explique pourquoi les firmes qui ont investi le plus dans les biotechnologies étaient des entreprises d'agrochimie, tandis que certaines n'ayant pas fait ce choix ont disparu du marché (American Cyanamid par exemple). Notons également que la taille de ces entreprises d'agrochimie et leurs efforts massifs en recherche leur donnaient une capacité importante pour investir dans les biotechnologies agricoles. Au final, ces différents mouvements ont conduit à une forte concentration de l'offre de semences et de pesticides entre quelques sociétés. Les principaux semenciers mondiaux aujourd'hui sont également les leaders sur l'offre de caractères OGM et les leaders sur l'offre de pesticides. Ces grands groupes, qui étaient aussi généralement présents dans le domaine de la pharmacie, ont progressivement séparé ces deux activités, dont la rentabilité est très différente, pour se spécialiser dans le domaine agricole. Cette concentration n'affecte pas trop la gamme de semences auxquelles les agriculteurs américains ont accès. En revanche, elle a conduit à un accroissement significatif du prix des semences (OGM ou non OGM) dans les années 2000, comme l'ont montré certaines analyses : le prix de la semence de soja non OGM a par exemple été multiplié par deux entre 2001 et 2011, et celui de la semence de soja OGM par 2,6 (4).

L'expiration prochaine de brevets sur certains caractères OGM, ainsi que le développement de nouveaux caractères, peuvent-ils conduire à plus de concurrence dans l'offre de caractères OGM ? Il est relativement peu probable qu'une telle évolution se produise : les leaders actuels sont souvent ceux qui ont investi le plus en recherche sur les biotechnologies agricoles ; de plus, ils disposent d'un important portefeuille de brevets, qui devrait leur permettre de maintenir leur situation très favorable, voire de la renforcer. Gardons en tête cependant que le niveau d'investissement en recherche dans ce secteur reste très important. Cette concentration ne devrait donc pas ralentir le rythme des innovations. En revanche, il convient d'être attentif aux conditions d'accès à ces innovations pour les agriculteurs, mission qui relève des autorités de concurrence. Il convient aussi de veiller à ce que cet effort massif de recherche sur les biotechnologies ne se fasse pas au détriment d'autres sources et formes d'innovation. ■

(1) J. Fernandez-Cornejo *et al.*, *Genetically Engineered Crops in the United States*, United States Department of Agriculture (USDA), 2014.

(2) **http://tinyurl.com/monsanto-tug-2016** *Technology Use Guide and IRM Overview*, Monsanto, 2016.

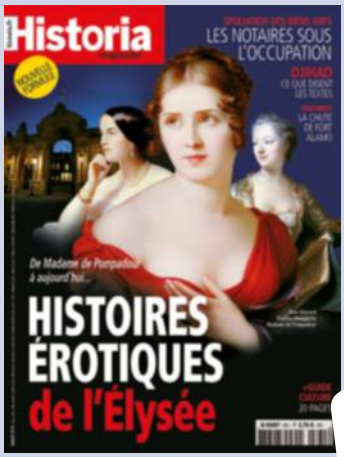
(3) K. O. Fuglie *et al.*, *Research Investments and Market Structure in the Food Processing, Agricultural Input, and Biofuel Industries Worldwide*, USDA, 2011.

(4) S. Lemarié et A. Fugeray-Scarbel (dir.), *Impacts des OGM sur les exploitations agricoles*, La Documentation Française, 2014.

OFFRE DÉCOUVERTE

réservée aux lecteurs de La Recherche

6 mois 24€ seulement



TOUS LES MOIS
les meilleurs historiens décryptent, pour vous, le présent à la lumière du passé.

Ne plus subir la frénétique marche du monde passe par un recul avec la culture de l'urgence et avec la vitesse à laquelle les informations nous submergent. C'est la raison d'être d'Historia. Au même titre que de vous éclairer sur la fiabilité historique des grandes séries télé, des films, des expositions, des romans, des albums de bandes dessinées ou des pièces de théâtre.

Le passé a cela de fabuleux qu'il nourrit sans cesse l'imaginaire des créateurs, tout autant que notre vie quotidienne. Hier c'est aujourd'hui ! **Et cette actualité se retrouve chaque mois à la Une d'Historia.**

Pour votre plus grand bonheur et le plaisir de cette découverte sans cesse renouvelée : l'histoire est au cœur de notre culture.

La rédaction

Historia Le magazine d'histoire au cœur de l'actualité

Bulletin d'abonnement

À renvoyer sous enveloppe affranchie à : HISTORIA
Service abonnements - 4 rue de Mouchy - 60438 Noailles cedex

PHLRC512

☑ **OUI**, je profite de cette Offre Découverte Historia pendant 6 mois au prix de 24€ seulement au lieu de 35,70€, soit plus de 30% de réduction.

J'indique mes coordonnées ☐ M. ☐ Mme ☐ Mlle

Nom : Prénom :

Adresse :

Code postal : Ville : Téléphone

Pour un meilleur suivi de votre commande, merci de nous indiquer votre email :

@

Je règle par ☐ chèque à l'ordre d'Historia ☐ carte bancaire

N° Expire fin :

Merci de noter les 3 derniers chiffres du numéro inscrit dans la zone signature, au dos de votre carte bancaire

Signature obligatoire

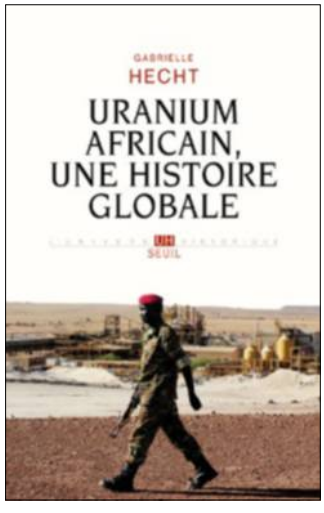
Offre exclusivement réservée aux nouveaux abonnés résidant en France métropolitaine et valable jusqu'au 31/12/16.
Conformément à la loi « Informatique et Libertés » du 06/01/78 (art 27) vous pouvez accéder aux informations vous concernant et les faire rectifier.

Le livre du mois

Uranium africain, une histoire globale

De Gabrielle Hecht

Si nous avons longtemps été bercés au son de *« l'énergie nucléaire est le garant de l'indépendance énergétique de la France »*, c'est que l'extraction d'uranium dans les anciennes colonies n'était pas considérée comme une dépendance à l'étranger, même après les indépendances. Le minerai, africain notamment, « comptait » si peu tant en termes d'argent que de main-d'œuvre que les industriels parvinrent à imposer l'idée du *« nucléaire bon marché »*. C'est sur ce type de considérations que débute l'enquête menée par Gabrielle Hecht, professeure à l'université du Michigan. Il s'agit là d'un travail de recherche acharné, à la fois lucide et iconoclaste.



Tout au long de l'ère nucléaire, les « choses », de même que les lieux, voire les États, ont compté à mesure qu'ils avaient une « nucléarité », c'est-à-dire un statut nucléaire et des dispositifs de pouvoir associés. La nucléarité de l'uranium fut toujours sujette à négociations dans la mesure où les rapports de force relevant de différents contextes historique, économique, politique, géographique y furent davantage déterminants que les critères techniques. L'uranium était jugé profondément « nucléaire » lorsque, pour envahir l'Irak, les Américains ont prétendu que Saddam Hussein allait détourner le *yellowcake* [concentré d'uranium, NDLR] acheté au Niger à des fins militaires. Il était au contraire très banal, et de fait exempté de la surveillance de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), lorsqu'industriels et États occidentaux organisèrent à partir de la fin des années 1960 un marché en partie illicite, moyennant cartels, sociétés-écrans, prix truqués, échanges de drapeaux ou encore falsifications administratives éludant la provenance de l'uranium sud-africain sous embargo. En Afrique du Sud, les mines d'uranium étaient considérées suffisamment nucléaires pour que le gouvernement siège au sein des agences internationales. Lesquelles furent les seules à accorder une telle reconnaissance internationale au régime d'apartheid dans les années 1980, et à retarder ainsi la transition du pays vers la démocratie. Au Niger ou au Gabon, les mines n'avaient au contraire pas assez de nucléarité pour que Hamani Diori ou Omar Bongo puissent réellement obtenir le contrôle des ressources naturelles de leur pays, ou négocier un juste prix pour la vente de leur uranium. De même au Sahel, quand la famine contraignit les dirigeants nigériens à déclarer vouloir exporter le *yellowcake* à n'importe quel prix, *« y compris au diable »*, cela n'indigna personne. Toutes ces mines n'étaient pas aussi nucléaires que celles du Limousin, étant donné que les mineurs « indigènes » étaient souvent moins bien protégés ou surveillés que leurs homologues de métropole, ou qu'une hausse des seuils d'exposition y était toujours envisageable lorsque la radioprotection s'avérait coûteuse. Combien de mineurs sud-africains n'ont jamais su qu'ils manipulaient de l'uranium, tandis que les ouvriers malgaches pensaient que leur dosimètre servait à détecter la tuberculose…

Des coulisses de l'AIEA aux mines à ciel ouvert du Gabon, des sommets d'État aux grèves des mineurs namibiens, des réunions de la Commission internationale de protection radiologique aux salles d'examen médical, ce livre nous fait savourer le goût de l'enquête. L'obstination de l'auteure à extraire une mine d'archives, dont certaines vouées à disparaître, y est pour beaucoup. La parole donnée aux ouvriers africains, témoignant sur le vécu, les formes de victimisation corporelle et les luttes de tous ceux que les agences internationales, les radioprotectionnistes ou les registres de cancer ont si souvent réduits au silence, y est tout autant. ■

Sezin Topçu, chargée de recherche au CNRS, Centre d'études des mouvements sociaux (IMM-Ehess).

Éditions du Seuil, 404 p., 23 €.

ÉPISTÉMOLOGIE

De la vérité dans les sciences

La science dit-elle la vérité ? Trop souvent, l'invocation de la science dans un débat ressemble à un argument d'autorité visant à couper court à la discussion. Dans ce petit livre stimulant, issu d'une discussion avec une philosophe, l'astrophysicien Aurélien Barrau examine le statut de la science et étudie son rapport à la vérité. Selon lui, les sciences sont le résultat d'une construction sociale, mais qui tient compte de la contrainte du réel. Une position provocante et rafraîchissante, exposée avec l'agréable mélange de fluidité et d'érudition caractéristique de l'auteur.

Aurélien Barrau, *Dunod, 96 p., 11,90 €.*

ASTROPHYSIQUE

Les Trous noirs

Cet ouvrage de la collection « Que sais-je ? », assurément très complet, arrive à point nommé pour nous rafraîchir les idées sur les trous noirs, dont on entend beaucoup parler en ce moment. Précisément depuis que l'on vient de détecter des ondes gravitationnelles qui signent la fusion de deux de ces astres denses. De multiples projets d'observation sont en cours. Prévues par la relativité générale, ces étoiles mystérieuses ne seront cependant entièrement comprises que lorsqu'on sera parvenu à réconcilier cette théorie avec la physique quantique.

Matteo Smerlak, *PUF, 128 pages, 9 €.*

PHILOSOPHIE

Des sexes innombrables

Chez la hyène tachetée, mâles et femelles sont dotés d'un organe en forme de pénis. Les femelles jacanas, des oiseaux aquatiques, sont pourvues de couleurs vives, défendent de larges territoires et se combattent entre elles pour la maîtrise des mâles qui s'occupent des couvées. Les hippocampes mâles réalisent la gestation. Et plus souvent qu'on ne le pense, des humains naissent porteurs d'un caryotype sexuel atypique. Le philosophe Thierry Hoquet se plonge dans la biologie pour rappeler la pluralité des types sexuels. Face à cette diversité, il juge arbitraire de vouloir à tout prix que l'humanité se répartisse en deux genres.

Thierry Hoquet, *Seuil, 249 p., 18 €.*

HISTOIRE DES SCIENCES

L'Homme neuronal, trente ans après

En 1983, *L'Homme neuronal*, de Jean-Pierre Changeux, fut l'un des premiers livres grand public publiés en français à dresser un portrait exhaustif des neurosciences. À l'époque, il suscite des réactions virulentes chez les philosophes et les psychanalystes. Voilà le débat à nouveau ouvert entre Jean-Pierre Changeux, ses collègues neuroscientifiques comme Yves Agid ou Lionel Naccache, des spécialistes des sciences humaines comme Céline Surprenant et des philosophes tel Frédéric Worms.

Sous la direction de Michel Morange, Francis Wolff et Frédéric Worms, *Éditions Rue d'Ulm, 154 p., 12 €.*

Physique

Le Mystère du monde quantique

Dans sa quête pour comprendre le monde quantique, Bob, accompagné de son chien Rick, rencontre les figures historiques des savants qui ont élaboré la théorie quantique. Dans cette bande dessinée de vulgarisation, les auteurs ont adopté un parti pris narratif à mi-chemin entre cours magistral et promenade dans le monde quantique afin de faire découvrir au lecteur les arcanes de cette discipline. Les concepts, souvent ardus, sont abordés avec des images éclairantes servies par le talent du jeune dessinateur belge Mathieu Burniat. Une fois ces idées fondatrices posées, l'ouvrage nous emmène vers l'interprétation de la mécanique quantique. Le scénariste (Thibault Damour, professeur à l'Institut des hautes études scientifiques) a fait le choix d'une explication par les univers multiples – ou multivers – promue par le physicien américain Hugh Everett. Dans cette interprétation, à chaque mesure quantique, l'Univers se scinde en deux mondes qui ne peuvent pas interagir l'un avec l'autre. Notre réalité est alors un monde multiple fait de réalités classiques différentes. Vertigineux.

Thibault Damour et Mathieu Burniat, *Dargaud, 160 p., 19,99 €.*

NEUROSCIENCES

La Myéline, le turbo du cerveau

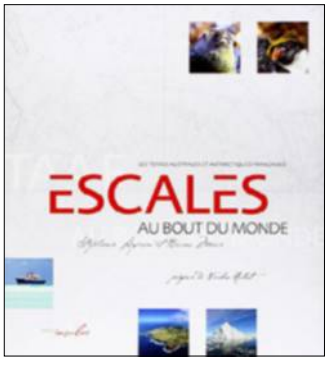
Qu'est-ce que la myéline et quel est son rôle ? Cette substance du cerveau qui entoure les neurones d'une gaine isolante accélère considérablement l'influx nerveux et par conséquent nos mouvements et nos pensées. Lorsqu'elle est lésée, les capacités motrices, sensorielles et cognitives s'en trouvent gravement affectées, pouvant même conduire au handicap. Ce livre explique de manière claire le fonctionnement de l'influx nerveux et l'importance capitale de cet « or blanc » enfoui dans nos cerveaux, dont l'étude est pleine de promesses.

Bernard Zalc et Florence Rosier, *Odile Jacob, 312 p., 24,90 €.*

Beau livre

Escales au bout du monde

Taaf, c'est par cet acronyme un peu barbare que l'on désigne les Terres australes et antarctiques françaises, qui englobent aussi bien les lagons translucides des îles Éparses de l'océan Indien que les étendues glacées de la terre Adélie, sur le continent Antarctique. Sans oublier, bien sûr, les îles Australes, situées dans les quarantièmes rugissants. Installés à la Réunion, Stéphanie Légeron et Bruno Marie, tous deux passionnés par la photographie et l'aventure, livrent ici le premier beau livre consacré à l'ensemble de cet outre-mer méconnu. Un projet auquel ils ont consacré plus de deux ans, avec le soutien de l'Administration des Taaf. Le résultat : un ouvrage mêlant récit de voyages et photographies, témoignages recueillis sur place, portraits de navigateurs qui ont marqué ces terres reculées, documentation sur la biodiversité et les programmes de recherche scientifique en cours. Il offre ainsi une vision inédite et exhaustive de ces régions, pour la plupart inaccessibles. Ce qui leur permet, comme le rappelle Nicolas Hulot dans la préface, d'être *« le refuge d'une vie sauvage extrêmement bien préservée et d'un patrimoine exceptionnel et insoupçonné »*.



Stéphanie Légeron et Bruno Marie, *Éditions Insulae, 448 p., 45 €.*

BOTANIQUE

Miscellanées des plantes

Anne-France Dautheville a découvert le monde des plantes en cultivant son jardin. Pour comprendre la logique qui le régit, cette journaliste et écrivain a parcouru des centaines d'ouvrages, des milliers d'articles, dont elle a retiré toutes sortes d'anecdotes. D'où vient le nom de la glycine ? Pourquoi vend-on du muguet le 1er mai ? Comment les chewing-gums sont-ils apparus ? Autant de questions qui trouvent leur réponse dans ce petit ouvrage, qui se « picore » plus qu'il ne se « dévore », pour reprendre les mots du biologiste Jean-Marie Pelt, auteur de la préface.

Anne-France Dautheville, *Buchet-Chastel, 144 p., 15 €.*

HISTOIRE DES SCIENCES

Le Génie de Pasteur au secours des poilus

Lors de la Première Guerre mondiale, les forces vives de l'Institut Pasteur sont mobilisées : près de 130 employés sont envoyés au front ; les autres soutiennent l'effort national en produisant à grande échelle vaccins (contre la typhoïde par exemple) et sérums (contre le tétanos entre autres), en contribuant à la découverte du bactériophage… mais aussi en élaborant des gaz de combat de plus en plus meurtriers. Ce livre raconte cet épisode de l'histoire de l'Institut avec rigueur, et une touche romanesque la plupart du temps bienvenue.

Annick Perrot et Maxime Schwartz, *Odile Jacob, 282 p., 24,90 €.*

PHYSIQUE

Le Dé d'Einstein et le Chat de Schrödinger

Albert Einstein, Erwin Schrödinger : deux des plus grands noms de la physique de la première moitié du XXe siècle. Les deux hommes ont aussi été amis, unis dans la recherche d'une « théorie du tout », capable de concilier relativité générale et physique quantique. Avec un souci de pédagogie, pas toujours couronné de succès, cet ouvrage retrace leur relation. Un récit qui rend bien compte de l'effervescence du domaine à l'époque, notamment pendant les années 1940 et l'invention de la bombe atomique, et des personnalités bien trempées des deux chercheurs.

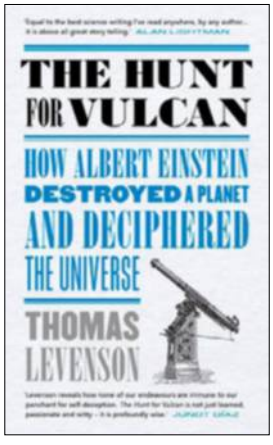
Paul Halpern, *Dunod, 320 p., 22 €.*

Lu d'ailleurs

The Hunt for Vulcan

De Thomas Levenson

Que font les scientifiques quand leur théorie n'est pas confirmée par les observations ? Ils la remettent en cause, entend-on souvent dire. Pourtant, historiquement, ce n'est pas toujours le cas, comme le montre dans ce livre Thomas Levenson, professeur de *Science Writing* au MIT, à propos d'une planète introuvable. L'histoire commence en 1859. En s'appuyant sur la théorie de la gravitation de Newton, l'astronome Urbain Le Verrier calcule la précession du périhélie de Mercure, c'est-à-dire le déplacement régulier du point de l'orbite de la planète le plus proche du Soleil. Bien qu'ayant pris en compte l'effet de toutes les autres planètes, il trouve un léger écart par rapport aux observations. Comme il avait lui-même prédit l'existence de la planète Neptune avant sa découverte en 1846 (pour expliquer des anomalies dans l'orbite d'Uranus), Le Verrier s'inspire de ce succès qui l'avait rendu célèbre. Il veut montrer là encore qu'une planète inconnue, proche de l'orbite de Mercure, permettrait d'expliquer cette nouvelle anomalie. Confiants dans la valeur de cette prédiction, les astronomes pointent donc leurs télescopes vers le ciel pour découvrir cette planète appelée Vulcan. Pourtant, il va y avoir un hic.



Pendant deux décennies, Vulcain va être observée plusieurs fois, bien que jamais de façon satisfaisante. Si, pour beaucoup, son existence ne fait pas de doute, le désir d'observations plus probantes se fait quand même sentir. Puis la situation change à partir de juillet 1878, lors d'une éclipse censée être propice à son observation. Vulcain ne s'étant pas laissé découvrir, le doute sur son existence s'installe chez les astronomes. Toutefois, cet échec ne les conduit pas à remettre en cause la théorie de Newton. Pendant plusieurs décennies, ils essaient de la sauver, par exemple en imaginant que le Soleil est aplati aux pôles ou en « triturant » légèrement la formule mathématique de la gravitation universelle. En vain. Aucune solution ne s'avère satisfaisante. Il faudra attendre 1915 pour qu'Albert Einstein fasse disparaître l'anomalie de l'orbite de Mercure avec sa nouvelle théorie de la gravitation et, du même coup, fasse définitivement oublier Vulcain.

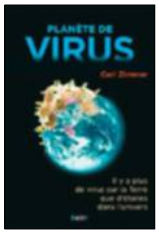
L'auteur en tire deux leçons : d'abord, qu'un conflit avec les observations ne conduit pas toujours les scientifiques à remettre en cause leur théorie de prédilection ; ensuite, qu'il est parfois *« facile de voir ce que l'on veut ou espère trouver »*. Reste à savoir si, de nos jours, les scientifiques ne se retrouvent pas dans une situation similaire face à certaines anomalies…

Thomas Lepeltier, chercheur indépendant en histoire et philosophie des sciences, Oxford.

Head of Zeus, 240 p., 14.99 £.

BIOLOGIE

Planète de virus



Les virus sont présents en nombre astronomique sur toute la planète. On les trouve dans les océans, sous la calotte glaciaire et même dans notre ADN, puisque 8 % de notre génome est d'origine virale. Ils contribuent à la production d'oxygène et à l'évolution des espèces. Le livre de Carl Zimmer, journaliste scientifique, présente de manière claire et accessible l'univers varié de ce qu'il nomme *« les plus petits êtres vivants connus »*, dont il reste encore beaucoup à découvrir, et la puissance, à la fois mortelle et créatrice, de ces organismes qui remettent en cause la définition même de vivant.

Carl Zimmer, *Belin, 128 p., 16 €.*

FICTION SCIENTIFIQUE

Les Savants : Ferrare, 1512

Invité à l'université de Ferrare où il a autrefois suivi ses études, Copernic est confronté à une série de meurtres mystérieux. Il fait alors la connaissance d'un jeune alchimiste, Paracelse, avec qui il se lie pour mener l'enquête… Luca Blengino, scénariste de cette première bande dessinée de la série *Les Savants* mêle habilement fiction et réalité dans une enquête policière qui trouvera quelques réponses dans l'histoire et la science. Très documenté sur les personnalités passées par Ferrare au XVI^{e} siècle, et sur les thèses qui font alors débat, comme l'héliocentrisme.

Luca Blengino et Stefano Carloni, *Quadrants, 56 p., 14,95 €.*

Persona, étrangement humain

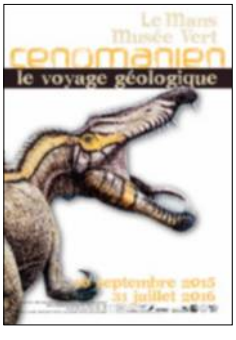
Les avancées technologiques des dernières décennies font évoluer nos sociétés occidentales pour les rapprocher de scénarios dignes des plus grands films de science-fiction. Les frontières entre l'humain et tout ce qui l'entoure semblent de plus en plus perméables, soulevant des questions sur la cohabitation entre l'homme, l'objet, l'animal et la machine. À l'heure des grands débats sur le transhumanisme et l'intelligence artificielle, le musée du quai Branly se métamorphose en laboratoire d'anthropologie. Persona explore les mécanismes par lesquels les cultures, des plus ancestrales aux plus contemporaines, personnifient les objets. Statues, amulettes, marionnettes, masques, robots ou automates : 230 œuvres y sont exposées. Comment la matière inerte est-elle transformée en objet animé ? Pour quelles raisons ? Quelles émotions sont ainsi provoquées ? Les arts premiers rejoignent ici les débats liés à la robotique : nos objets doivent-ils nous ressembler ? À quel point ? Les robots sont-ils des personnes « non humaines » ?
Paris, musée du quai Branly, jusqu'au 13 novembre. *tinyurl.com/persona-quai-branly*

EXPOSITIONS

Jusqu'au 26 juin
Sols fertiles, vies secrètes

Les sols sont des systèmes complexes, fragiles et vivants, où l'on trouve quantité d'animaux étonnants. L'exposition montre comment sont cultivés les fruits et légumes qui garnissent nos assiettes, quelles menaces subissent nos sols, et quelle pourrait être l'agriculture de demain.
Angers (Maine-et-Loire), Muséum des sciences naturelles.
tinyurl.com/angers-sols

Jusqu'au 31 juillet



Cénomanien, le voyage géologique

L'exposition propose un voyage vers le Cénomanien, il y a 100 millions d'années, l'une des périodes les plus chaudes de l'histoire de la Terre. Le niveau marin dépassait alors de 150 mètres sa hauteur actuelle, les dinosaures dominaient les continents, et les plantes à fleur s'épanouissaient.
Le Mans (Sarthe), musée Vert.
tinyurl.com/cenomanien

Jusqu'au 31 juillet
Comètes, à la poursuite de Rosetta

D'où viennent les comètes ? Comment les distinguer des météorites, des astéroïdes, des étoiles filantes ? Expériences, maquettes et jeux interactifs permettent de comprendre la mission Rosetta, première exploration d'une comète, et son objectif : la recherche de nos origines.
Vaulx-en-Velin (Rhône), Planétarium.
www.planetariumvv.com/expotemp/cometes/

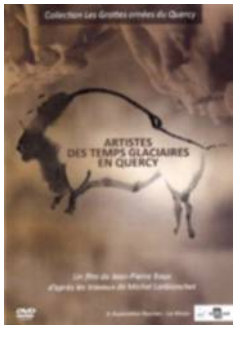
CONFÉRENCES

Les 31 mai, 7 et 14 juin, 19 h
Villes du futur

Réduire les émissions de gaz à effet de serre, faire face à l'augmentation du niveau marin et de la population : tels sont les défis auxquels les villes vont devoir faire face à l'avenir. Des chercheurs urbanistes, architectes, géographes ou encore océanographes abordent ces problématiques au cours de trois conférences.
Paris, Cité des sciences et de l'industrie.
tinyurl.com/villes-futur

Le 2 juin, 20 h 30
Grottes ornées en Quercy

Le film « Artistes des Temps glaciaires en Quercy » dresse un bilan des connaissances sur 30 grottes du Quercy, ornées par des artistes au Paléolithique supérieur, de 35 000 à 13 000 ans avant notre ère. Il retrace les recherches du préhistorien Michel Lorblanchet, présent pour un débat avec le public.



Toulouse (Haute-Garonne), communauté municipale de Santé.
tinyurl.com/smsp-quercyl

Le 7 juin, 19 h 30
La science est-elle victime des pièges de l'audimat ?

La rapidité de l'information et le sensationnalisme ont une influence sur la diffusion des connaissances scientifiques, au point de détériorer l'image de la science, estime l'astronome Suzy Collin. Elle analyse ces pratiques médiatiques et propose des outils pour y remédier.
Paris, Institut d'astrophysique.
tinyurl.com/iap-grandNord

Le 9 juin, 18 h
La réalité virtuelle au service du réel

Apprivoiser sa peur du vide, améliorer ses performances sportives, ou encore expérimenter de nouveaux gestes chirurgicaux : la réalité virtuelle propose de nouvelles procédures de formation ou de thérapie. Daniel Mestre, chercheur à l'Institut des sciences du mouvement, montre

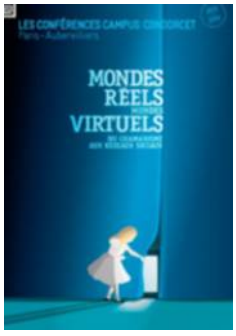
l'étendue des possibilités de cette technologie.
Marseille (Bouches-du-Rhône), CNRS.
www.provence-corse.cnrs.fr/-Les-Jeudis-du-CNRS

Le 9 juin, 18 h 30
Science, parascience et pseudosciences

Cryptozoologie, dessein intelligent, graphologie… est-ce de la science ? De nombreux courants de pensée utilisent l'argument scientifique pour appuyer leurs idées. Benoît Grison, chercheur en sciences cognitives, rappelle le principe de la démarche scientifique, et explique comment démêler le vrai du faux.
Toulouse (Haute-Garonne), Muséum.
www.museum.toulouse.fr/agenda

Le 11 juin, 15 h
Mars : pour quand le voyage ?

Alain Souchier, ingénieur en propulsion spatiale, est président de l'association Planète Mars, destinée à encourager l'exploration de la planète Rouge. Il explique les défis que représente un voyage habité vers Mars : quelles conséquences sur l'équipage ? Comment se poser ? Comment en revenir ?
Paris, palais de la Découverte.
www.palais-decouverte.fr/fr/au-programme/activites/conferences



Le 13 juin, 19h
Le chamanisme, fabrique de chance

Le chamanisme consiste à établir des relations virtuelles d'alliance et d'échange avec d'autres espèces, pour rendre la chasse légitime et profitable. L'anthropologue Roberte Hamayon décrit la construction de cette réalité virtuelle, qui vise à porter chance.
Aubervilliers (Seine-Saint-Denis), théâtre de la Commune.
tinyurl.com/condorcet-chamanisme

Le 14 juin, 20 h
L'origine du champ magnétique terrestre

Le champ magnétique trouve son origine à 3000 kilomètres sous nos pieds : un phénomène de dynamo génère des courants électriques dans le noyau liquide de la Terre. L'astronome Emmanuel Dormy décrit l'origine de ce mécanisme, également présent dans les étoiles.
Toulouse (Haute-Garonne), observatoire Midi-Pyrénées.
tinyurl.com/obs-mip-dormy

Le 28 juin, 19 h 30
La Grotte des rêves perdus

Avec ce documentaire, le réalisateur Werner Herzog met à profit de nouvelles technologies pour faire découvrir en 3D la grotte Chauvet et ses peintures rupestres. Après la projection, Philippe Walter, chimiste, et Mehdi Tayoubi, vice-président de Dassault Systèmes, discutent des apports de la science à l'histoire et à l'art.
Paris, cinéma Grand Action.
www.ihp.fr/cine-club-2016

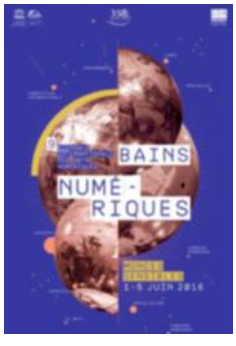
FESTIVALS

Du 30 mai au 5 juin
Festival du film de chercheur

Onze films ont été retenus pour cette édition du festival : des chercheurs y présentent leurs travaux sur les Néandertaliens, les accidents géologiques, les prédateurs marins ou le fonctionnement de la recherche scientifique. À ce programme s'ajoutent des projections-débats sur le thème de l'alimentation.
Vandœuvre-lès-Nancy (Meurthe-et-Moselle), domaine du Charmois.
www.filmdechercheur.eu

Du 1er au 5 juin
Bains numériques

La biennale des arts numériques s'associe avec l'Académie des sciences pour explorer les relations entre l'art et la science. Les neurosciences ou les mathématiques y rencontrent diverses formes de création. Des installations, expositions, laboratoires et ateliers investissent la ville pour susciter des discussions entre artistes, scientifiques et public.



Enghien-les-Bains (Val-d'Oise), centre des arts.
www.cda95.fr/fr/bains-numeriques

Du 9 au 19 juin
Futur en Seine

Big data, robotique, Internet des objets, réalité virtuelle… Le festival met en avant les applications de ces innovations au monde du sport, à travers des conférences, démonstrations et compétitions. L'objectif de ces 150 événements : faire réfléchir sur les futurs enjeux de ces technologies, en compagnie notamment de chercheurs et d'innovateurs.
Région Île-de-France.
http://futur-en-seine.fr/

Journées de l'archéologie

Chantiers, musées, expositions, laboratoires… Plus de 600 lieux ouvrent leurs portes au grand public dans toute la France pour 1000 manifestations. À travers des visites guidées, découvrez les nécropoles mérovingiennes d'Audun-le-Tiche (Moselle) ou d'Escolives-Sainte-Camille (Yonne), les mines de cuivre des ducs de Lorraine au Thillot (Vosges), les thermes gallo-romains d'Entrammes (Mayenne) ou le plateau de Gergovie (Puy-de-Dôme). Accédez à des sites de fouilles comme à l'église Saint-Martin de Luxeuil-les-Bains (Haute-Saône), où ont été découverts plus de 325 tombes et 125 sarcophages. Observez le travail des chercheurs au Centre de recherches archéologiques de La Courneuve (Seine-Saint-Denis) ou avec le Groupe de recherche en archéologie sous-marine à Marseille.
Les 17, 18 et 19 juin, dans toute la France. http://journees-archeologie.fr

Pourquoi le temps passe-t-il de plus en plus vite ?

À mesure que l'on vieillit, le temps semble filer toujours plus vite. Est-ce un lieu commun ou une réalité ? Le psychologue allemand Marc Wittmann a voulu le vérifier. Il a donc interrogé 499 volontaires, âgés de 14 à 94 ans, pour savoir à quel point le temps leur avait semblé passer vite la semaine, le mois, l'année et la décennie précédant l'entretien. Résultat de cette étude, parue en 2005 : il n'a noté aucune différence significative entre les classes d'âge. À l'exception de la dernière décennie qui a paru passer plus vite aux plus âgés (1).

Cette question du temps qui passe n'est pas récente. Déjà en 1877, le philosophe français Paul Janet attribuait cette différence au caractère subjectif de notre perception du temps. Tout intervalle de temps serait ainsi jugé par rapport à la totalité du temps vécu. Avant de fêter son prochain anniversaire, un enfant de 5 ans va trouver le temps long car un an équivaut pour lui à 20 % de sa vie. Au contraire, pour un adulte de 50 ans, un an représente seulement 2 % de sa vie.

En 1890, le psychologue américain William James propose une autre explication. Pour lui, l'apparente accélération du temps est corrélée au nombre d'événements mémorables qui aurait tendance à diminuer avec l'âge. Quand on est jeune, chaque expérience est nouvelle, unique et donc marquante. En vieillissant, les découvertes sont plus rares, les apprentissages moins nombreux, on est moins surpris, tout est plus routinier. Les événements sont donc moins individualisés, les souvenirs s'uniformisent en un imbroglio mémoriel tel qu'ils deviennent difficiles à discerner. Or, moins l'on parvient à mettre le doigt sur la date et le contenu précis d'un événement, plus cela donne l'impression que le temps s'est écoulé vite.

Pire. En prenant de l'âge, nous avons tendance à sous-estimer la durée qui nous sépare d'un événement, aussi marquant soit-il. Prenons l'exemple des attentats du 11 septembre 2001. Jetant un coup d'œil dans le rétroviseur, certains pourraient être à amenés à se dire : « quinze ans déjà ! », l'événement ne leur paraissant pas si vieux. C'est précisément cette prise de conscience (répétée) d'un décalage entre le temps perçu et le temps réel qui amènerait à la constatation que le temps file toujours plus vite. Cette impression peut aussi s'expliquer par des agendas trop remplis. De fait, lorsqu'on n'a pas le temps d'accomplir tout ce qu'on avait prévu dans un certain laps de temps, les journées paraissent bien courtes !

Pour les biologistes, la perception d'une accélération du temps qui passe proviendrait d'une horloge interne dans le cerveau dont les battements s'espaceraient avec l'âge. Des recherches en psychologie expérimentale ont montré que des volontaires d'âges différents auxquels on demande d'appuyer sur une touche au rythme qui leur semble le plus naturel adoptent des rythmes bien distincts. Les plus jeunes ont tendance à frapper la touche avec un rythme beaucoup plus rapide que leurs aînés (2). Or, le cours des événements se mesurerait comparativement au rythme de notre horloge biologique : plus elle ralentirait, plus le cours des événements semblerait s'accélérer.

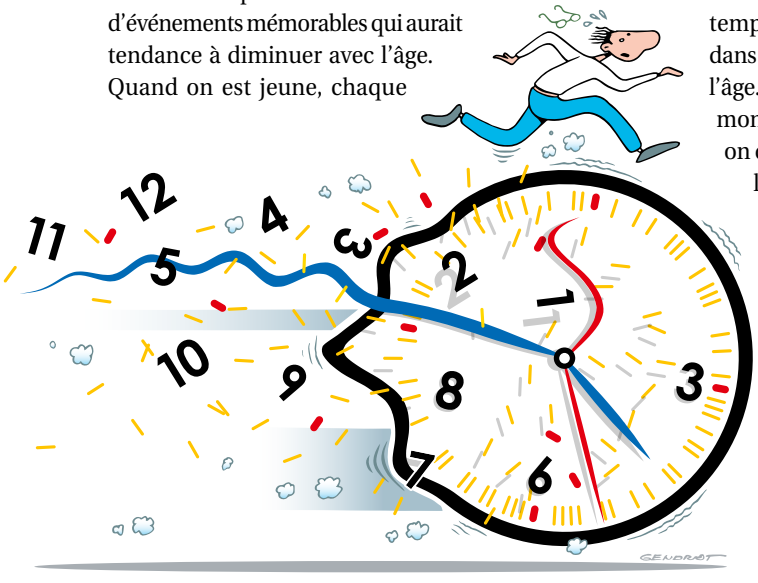


ILLUSTRATION PAUL GENDROT

Gautier Cariou

(1) M. Wittmann et S. Lehnhoff, *Psychological Reports, 97,* 921, 2005.
(2) J.D. McAuley *et al., Journal of Experimental Psychology, 135,* 348, 2006.

Remerciements à Simon Grondin, chercheur en psychologie expérimentale à l'université Laval, au Québec.

arte EDITIONS

LES POUVOIRS DU CERVEAU

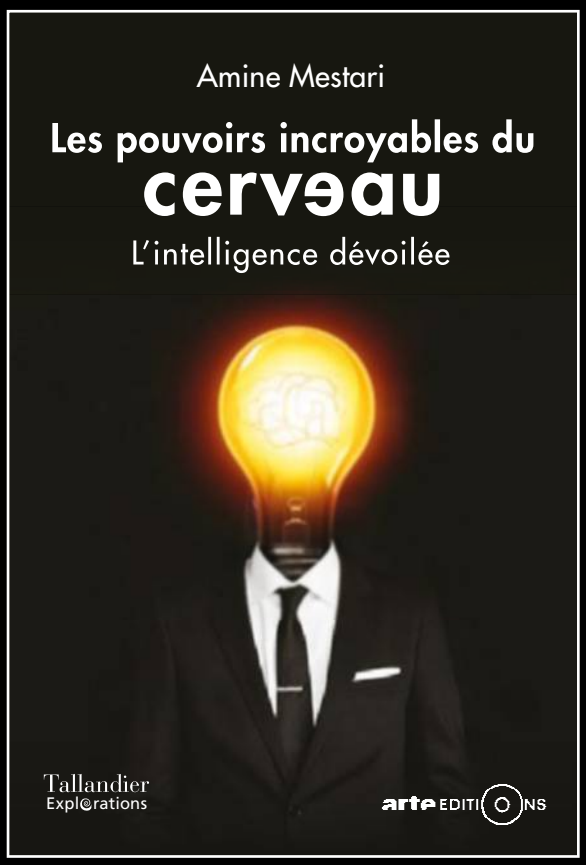
Un livre et un DVD à paraître le 3 mai

D'où viennent nos pensées ?

D'où vient l'intelligence émotionnelle ?

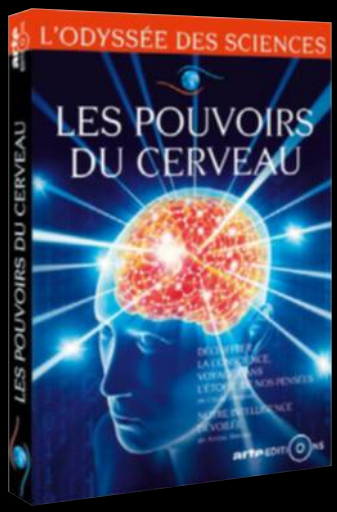
Quels sont les liens entre matière et esprit ?

Qu'est-ce que l'intelligence ?



Qu'est-ce que la conscience ?

Peut-on améliorer sa propre intelligence ?



Amine Mestari dissèque les diverses formes d'intelligence à travers une longue enquête menée auprès de nombreux scientifiques, psychologues, biologistes, généticiens, philosophes.

Deux films dans le DVD
«DÉCHIFFRER LA CONSCIENCE, VOYAGE DANS L'ÉTOFFE DE NOS PENSÉES»
et **«NOTRE INTELLIGENCE DÉVOILÉE»**

Livre et DVD disponibles en précommande dès maintenant sur **www.arteboutique.com**

OPEN INNOVATION

by

COSMETIC VALLEY
FRANCE

START UP, SME, PROJECT LEADER

MAJOR COSMETIC & PERFUMERY COMPANIES

Submit your projects & Get high qualified meetings at

COSMETIC360®
INNOVATIONS & SOLUTIONS > PARIS

© www.plainevue.fr - 2016

Register online before June 30th, 2016

www.cosmetic-360.com

+33 (0)2 37 211 211 - contact@cosmetic-360.com